

El reúso de agua residual tratada en América Latina y el Caribe: 10 ESTUDIOS DE CASO

Autores:

Maria Eugenia de la Peña

Christian Larrea

Keisuke Sasaki

David Smith

ABRIL
2022



ÍNDICE

1.	Reconocimientos y agradecimientos	6
2.	Introducción	7
3.	Contexto y justificación	8
4.	Metodología	9
	Criterio de selección de los casos	9
	Fase 1: Preparación	9
	Fase 2: Recolección de información	10
	Fase 3: Consulta y seguimiento	10
	Fase 4: Informe final	10
5.	Descripción y análisis de los casos	11
	Caso 1: Antofagasta	11
	Caso 2: Aquapolo Ambiental	16
	Caso 3: Atotonilco	22
	Caso 4: Cerro Verde	28
	Caso 5: Monterrey	33
	Caso 6: Puerto Madryn	38
	Caso 7: Rose Hall	43
	Caso 8: Sacaba	48
	Caso 9: Tenorio	54
	Caso 10: Santiago de Chile	60
6.	Hallazgos y lecciones aprendidas	65
	6.1. Principales motivadores	65
	6.2. Tecnologías utilizadas	66
	6.3. Retos encontrados	68
	6.4. Lecciones aprendidas	69
7.	Conclusiones	70
8.	Referencias	71

TABLAS

Tabla 1:	Destino de reúso de las aguas tratadas por la PTAR de Antofagasta	13
Tabla 2:	Caudal contratado por cada empresa (l/s)	19
Tabla 3:	Las PTAR del sistema de reúso de Monterrey y sus respectivos caudales de tratamiento	34
Tabla 4:	Estructura tarifaria al mes de marzo, 2021	36
Tabla 5:	Tratamientos de las PTAR de Sacaba	50
Tabla 6:	Costos de operación de las PTAR de Sacaba	51
Tabla 7:	Principales motivadores de reúso	66
Tabla 8:	Tecnologías usadas	67

FIGURAS

Figura 1:	Variabilidad de los 10 casos seleccionados, respecto del caudal y destino final de los efluentes tratados	9
Figura 2:	Planta de tratamiento de Antofagasta	11
Figura 3:	Proceso de tratamiento de la PTAR Antofagasta	13
Figura 4:	Esquema de gestión de Antofagasta	14
Figura 5:	Flujo de capital, PTAR Antofagasta	14
Figura 6:	PTAR Aquapolo	16
Figura 7:	Proceso operativo de la PTAR Aquapolo	18
Figura 8:	Esquema de gestión de Aquapolo S.A.	19
Figura 9:	Flujo de capital, PTAR Aquapolo	20
Figura 10:	PTAR Atotonilco	22
Figura 11:	Proceso operativo de la PTAR Atotonilco	24
Figura 12:	Esquema de gestión de Atotonilco	25
Figura 13:	Flujo de capital, PTAR Atotonilco	26
Figura 14:	PTAR La Enlozada	28
Figura 15:	Proceso operativo de la PTAR La Enlozada	30
Figura 16:	Esquema de gestión de La Enlozada	30
Figura 17:	Flujo de capital, PTAR La Enlozada	31

Figura 18:	PTAR Dulces Nombres	33
Figura 19:	Proceso operativo de las PTAR de Monterrey	35
Figura 20:	Esquema de gobernanza de las PTAR de Monterrey	36
Figura 21:	Lagunas de tratamiento facultativas PTAR Norte de Puerto Madryn	38
Figura 22:	Proceso operativo de la PTAR Norte de Puerto Madryn	39
Figura 23:	Esquema de gestión de las PTAR en Puerto Madryn	40
Figura 24:	Flujo de capital, Puerto Madryn	41
Figura 25:	PTAR de Rose Hall Company Limited	43
Figura 26:	Proceso operativo de la PTAR Rose Hall Utilities Limited	44
Figura 27:	Esquema de gestión de la PTAR Rose Hall Utilities Limited	45
Figura 28:	Flujo de capital, PTAR Rose Hall Utilities Limited	46
Figura 29:	PTAR El Abra	48
Figura 30:	Proceso operativo de las PTAR de Sacaba	49
Figura 31:	Esquema de gestión de las PTAR de Sacaba	51
Figura 32:	Flujo de capital, PTAR de Sacaba	52
Figura 33:	PTAR Tenorio San Luís Potosí	54
Figura 34:	Proceso operativo de la PTAR Tenorio	56
Figura 35:	Esquema de gestión de la PTAR Tenorio	57
Figura 36:	Flujo de capital, PTAR Tenorio	57
Figura 37:	PTAR La Farfana	60
Figura 38:	Proceso operativo de las PTAR La Farfana y Mapocho-Trebal	61
Figura 39:	Esquema de gestión de las PTAR de la región metropolitana de Santiago	62
Figura 40:	Flujo de capital, PTAR de Santiago	63
Figura 41:	Principales retos encontrados	68

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AECID	Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo
AIDIS	Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental
APP	Asociación Público-Privada
Arseps	Agencia Reguladora de Saneamiento y Energía del Estado de São Paulo
ARTE	Aguas del Reúso del Tenorio S.A.
ATVM	Consortio Aguas Tratadas del Valle de México
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CAD	Comité de Ayuda al Desarrollo
CAF	Banco de Desarrollo de América Latina
CEA	Comisión Estatal del Agua
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CFE	Comisión Federal de Electricidad
Conagua	Comisión Nacional del Agua
CORFO	Corporación de Fomento de la Producción
ECONSSA	Empresa Concesionaria de Servicios Sanitarios
EMAPAS	Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Sacaba
FCAS	Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento
FI-FCTS	Fondo de Inversión del Fondo de Indemnización por Cesantía de la Caixa Economica Federal de Brasil
FONADIN	Fondo Nacional de Infraestructura
LAC	América Latina y el Caribe
LAIF	Facilidad de Inversión en América Latina
MBR	Membranas de ultrafiltración sumergidas
MINAM	Ministerio del Ambiente del Gobierno del Perú
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONG	Organización No-Gubernamental
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
SABESP	Companhia de Saneamento Basico do Estado de São Paulo
SADM	Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey
SEDAPAR	Servicio de Agua Potable y Alcantarillado
SERVICOOP	Cooperativa de Servicios Públicos
SMCV	Sociedad Minera Cerro Verde
WRI	World Resources Institute
WWAP	World Water Assessment Programme

1 RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

Esta Nota Técnica fue preparada por Maria Eugenia de la Peña, Keisuke Sasaki, Christian Larrea y David Smith, basada en un estudio de consultoría realizado por David Smith.

Se agradece, de manera muy especial, a todas las personas que han estado involucradas, ya sea en el diseño o implementación de los 10 casos que se presentan en esta nota, y quienes brindaron la información para poder integrar esta publicación, tanto de forma documental como a través de entrevistas: Florentino Ayala y Kharla Aguilar de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM); Jaime Yañez Peredo (San Luis Potosí); Cynthia Cameron-Scott (Rose Hall Developments Limited); Facundo Ursino (Puerto Madryn); Oscar Zelada y M.E. Ramírez Antelo (EMAPAS); Yves Lesty (Aguas Andinas); Fernando Velásquez y Patricia Castañeda (ECONSSA); Antonio Atienzar (Acciona); Francisco Quezada y R. Jiménez (Sedapal); Sheila de Oliveira y Marcio da Silva Jose (Aquapolo).

También agradecer a Mathias Brummer por la ayuda en la recopilación de la información y a las personas que dieron sus comentarios a la nota: Maria Eduarda Gouvea, Francisco Gonzalez Medina, Pedro Moreo, Fernando Benavente, Isabel León e Ignacio del Río del CEDEX.

Los recursos para llevar a cabo estos trabajos proceden de la Cooperación Técnica Regional (RG-T3478) -Tratamiento de aguas residuales y reúso en América Latina y el Caribe (LAC). En el marco del instrumento LAIF, la Unión Europea firmó un acuerdo con la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), para la gestión del proyecto regional "Promover la adaptación al cambio climático y la gestión integral de los recursos hídricos en el sector de agua y saneamiento en América Latina en el marco del Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento (FCAS)", el cual establece que las actividades relacionadas con asistencias técnicas serán ejecutadas a través del Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Desde el 2008, el BID y el gobierno de España, mantienen una fuerte alianza para apoyar a los países de América Latina y el Caribe en impulsar el sector de agua y saneamiento, el reúso de agua residual tratada y el aprovechamiento de los productos generados en el saneamiento, son un aspecto clave de este desarrollo. Las opiniones expresadas en el presente documento no reflejan, necesariamente, la opinión oficial de la Unión Europea, ni de la AECID o el BID.

2 INTRODUCCIÓN

América Latina y el Caribe (LAC) cuentan con un tercio de los recursos hídricos a nivel mundial. Sin embargo, las ciudades y las zonas productivas de la región presentan altos niveles de estrés hídrico debido a la distribución desigual de los recursos hídricos. Basado en datos del World Resources Institute (WRI), más de la mitad de la población vive en áreas que están sujetas a situaciones de estrés hídrico medio, alto o extremadamente alto (Datshkovsky, 2022) y se agravará por el efecto del cambio climático (BID, 2019). Para hacer frente a esta situación, la reutilización de las aguas tratadas surge como una alternativa, principalmente, en aquellas zonas que tienen la necesidad de buscar fuentes complementarias, debido a la escasez de recursos hídricos.

Los avances tecnológicos en el campo de la reutilización de aguas tratadas han crecido exponencialmente en los últimos años, permitiendo que la misma pueda tratarse hasta alcanzar niveles de calidad que satisfagan a sectores que van desde el uso ambiental hasta la reutilización para consumo humano (Moreno, 2019). Sin embargo, a pesar del desarrollo tecnológico y el alto potencial de reúso en la región, incrementar el uso de las aguas residuales tratadas es aún un gran reto para el sector del agua y saneamiento, sobre todo, considerando los bajos niveles de tratamiento de aguas residuales que aún se presentan. A nivel regional, la cobertura de hogares con aguas residuales tratadas varía entre 22 % y 40 %¹, con una importante variación entre países, sin poder asegurar, además, que los efluentes recolectados reciben el nivel de tratamiento adecuado. Además, de estas aguas residuales recolectadas, los niveles de reúso no superan el 5 % (BID, 2017; World Bank, 2020).

Se suma a lo anterior el limitado aprovechamiento de las aguas residuales tratadas que se da hoy en la región, debido a varios factores, entre los que se destacan: (i) la falta de un marco normativo y regulatorio adecuado que defina, con claridad, las facultades de los actores sectoriales para el aprovechamiento de las aguas residuales; (ii) la falta de conocimiento sobre el potencial de reusar el agua tratada a nivel técnico y político; (iii) la falta de programas institucionales y de financiamiento que promuevan y apoyen estas prácticas; (iv) la desconfianza que puede existir, entre la población, para el reúso de agua residual tratada en actividades productivas; y, por último, (v) la incertidumbre financiera a la inversión pública y privada.

Sin embargo, a pesar de esta situación, existen experiencias, en la región, que se han convertido en casos de éxito en materia de reúso de aguas residuales tratadas, así mismo, en la gestión de lodos y otros aspectos de revalorización de recursos. Por tanto, la presente nota técnica pretende analizar 10 casos significativos de LAC, a fin de extraer lecciones aprendidas que puedan servir de referencia para los distintos actores que estén explorando la oportunidad de la reutilización de efluentes tratados de la región. Como criterios para la selección de los casos de estudio se ha atendido no solo la cobertura geográfica de la región, sino también los distintos tipos de reúso del agua tratada, caudales y usuarios finales, a fin de mostrar la viabilidad de este tipo de iniciativas, a pesar de que existan condiciones diferentes para su implementación.

¹ El porcentaje varía de acuerdo con la fuente consultada.

3 CONTEXTO Y JUSTIFICACIÓN

La agenda aprobada por Naciones Unidas para el año 2030 busca mejorar la calidad de vida de la población del mundo, a través de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En el contexto de los ODS, se encuentra el número 6: Disponibilidad y gestión sostenible de agua y saneamiento para todos. En este aspecto, a pesar de que se han logrado importantes avances, a nivel mundial, para prestar servicios de agua y al saneamiento a la población², un estudio realizado por la CEPAL (2019) indica que los países aún deben doblar esfuerzos para poder alcanzar todos los objetivos englobados en el ODS 6. Específicamente, la meta 6.3 establece la reducción, a la mitad, del porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentar, considerablemente, su reciclaje y reúso sin riesgo, lo cual, significan retos importantes no solo en inversión sino también en fortalecimiento del marco institucional y regulatorio correspondiente.

Específicamente en LAC, se estima necesaria una inversión aproximada de USD 170 billones para alcanzar la universalización de los servicios en el año 2030, lo que significa dotar de servicios de agua y saneamiento a 124 y 196 millones de personas, respectivamente (BID, 2017). En lo que se refiere a tratamiento de aguas residuales, mientras que algunos países como Chile (72 %), México (51 %) y Ecuador (43 %), muestran un alto nivel de cobertura de saneamiento doméstico, el resto de los países de LAC presentan coberturas inferiores al 40 % (Ritchie & Ortiz-Ospina, 2018).

Sumado a esto, hacer frente a los desafíos del ODS 6 resulta más desafiante en aquellos lugares donde el cambio climático conlleva un incremento en el requerimiento de agua por parte de los propios ecosistemas, situación que, a su vez, contrasta con las necesidades para el desarrollo humano. De acuerdo con predicciones del Panel Intergubernamental de Cambio Climático, la escasez del suministro de agua aumentará en aquellas regiones que, actualmente, son semiáridas y vulnerables, intensificando la problemática de las áreas que ya se encuentran bajo situación de estrés hídrico (IPCC, 2016). En particular, en la región, dado que el 80 %³ de la población vive actualmente en áreas urbanas, es además crucial reconocer la importancia de la relación agua-ciudad (Peña, 2016). El Programa Mundial de Evaluación de Recursos Hídricos indica que el crecimiento acelerado de la población urbana conlleva a la profundización de las desigualdades en el acceso al agua y saneamiento y, por tanto, aumenta la vulnerabilidad de los más necesitados (WWAP, 2020).

Para hacer frente a estos retos, se requiere de mayores esfuerzos por parte de todos los actores involucrados, a modo de lograr una gestión integrada y eficaz de los recursos hídricos, considerando aspectos de cantidad y calidad. En este contexto, se remarca la importancia de la gestión de las aguas residuales; concretamente, en el financiamiento y la mejor gestión para alcanzar el saneamiento seguro y reducir el impacto ambiental. En este sentido, el tratamiento y posterior reúso de las aguas, supone una gran oportunidad para la región LAC por su potencial contribución a reducir la escasez, alcanzar la seguridad hídrica y mejorar el saneamiento ambiental.

² De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas, entre 2000 y 2020, la cobertura de agua segura se incrementó del 61 % al 74 %, y la cobertura de saneamiento seguro creció del 28 % al 53 %.

³ Se estima que la población en zonas urbanas siga creciendo hasta alcanzar un 90 %, en 2050 (BID, 2018).

4 METODOLOGÍA

CRITERIO DE SELECCIÓN DE LOS CASOS

La presente nota técnica sintetiza, actualiza y complementa un trabajo de consultoría realizado en 2019, que consistió en el estudio y análisis de diez casos de reúso de aguas tratadas en América Latina y el Caribe (LAC).

FASE 1 PREPARACIÓN

Con el objetivo de obtener una muestra representativa de casos de reúso en la región, se inició con una identificación a través de información secundaria y entrevistas, con lo que se obtuvo una relación de 15 casos. De estos, se seleccionaron 10, tomando en cuenta los criterios listados a continuación:

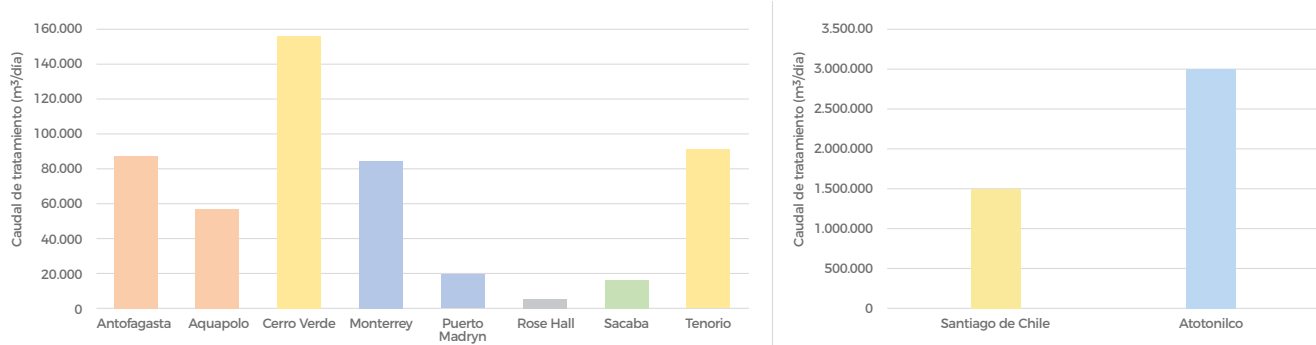
- Representatividad de los países de la región LAC (ubicación geográfica, niveles de desarrollo económico y sectorial).
- Diversidad en la tipología de reúso (agrícola, urbano, ambiental e industrial); ver figura 1.
- Tipología del impacto generado en su contexto.
- Volumen tratado significativo que permita generar impactos en el área de emplazamiento de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).
- Proyectos que, actualmente, estuvieran funcionando.
- Capacidad multidisciplinar de los esquemas, incluyendo no solo el reúso del agua tratada sino también la gestión de los nutrientes y lodos producto del tratamiento.

Los proyectos seleccionados fueron:

CASO	NOMBRE	PAÍS
1	Antofagasta	Chile
2	Aquapolo Ambiental	Brasil
3	Atotonilco	México
4	Cerro Verde	Perú
5	Monterrey	México
6	Puerto Madryn	Argentina
7	Rose Hall	Jamaica
8	Sacaba	Bolivia
9	Tenorio	México
10	Santiago de Chile	Chile

También, durante esta etapa, se preparó la plantilla de las fichas para la recogida de información de los casos y, a su vez, se identificaron los contactos locales de cada uno para establecer un primer acercamiento.

Figura 1: Variabilidad de los 10 casos seleccionados, respecto del caudal y destino final de los efluentes tratados



Fuente: Elaboración propia

FASE 2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La segunda fase metodológica consistió en un análisis sistemático de la literatura existente en relación con cada caso seleccionado. A tal fin, se siguieron tres subfases:

1. Realización de una base de datos en formato Excel para cada caso de estudio con la siguiente información recopilada: (i) contactos de referencia; (ii) contexto; (iii) información técnica, financiera y ambiental; (iv) retos encontrados en el desarrollo del sistema de tratamiento; y por último, (v) lecciones aprendidas en la experiencia.
2. Profundización de la bibliografía recopilada y contacto con fuentes cercanas a los proyectos, a fin de redactar un primer borrador de las fichas de estudio.
3. Creación de un modelo de entrevistas individualizadas, basadas en la información necesaria para poder completar la plantilla inicial.

FASE 3 CONSULTA Y SEGUIMIENTO

Tras la elaboración de las primeras versiones de las fichas, basadas en fuentes secundarias, se prosiguió con cinco subfases:

1. Realización de un listado de contactos locales basado en los diez casos a analizar. También, en esta etapa, se contactaron actores relacionados a otros potenciales proyectos, en caso de que algunos de los identificados declinasen participar o no tuviera disponibilidad.
2. Realización de un total de 10 entrevistas a actores locales, en base al modelo de entrevista individualizado. La duración de las entrevistas fue entre una y dos horas, y las mismas fueron transcritas y analizadas.
3. Transferencia de la información al modelo de ficha de cada caso de estudio. Identificación de posibles requerimientos de nueva información, no mencionados o abordados durante la entrevista.
4. Una vez sintetizada la información recolectada, en las fichas correspondientes, se volvió a comunicar con los contactos locales, por correo electrónico, a fin de completar y detallar aspectos técnicos provistos durante la entrevista como, por ejemplo, datos económicos o valores promedio de ciertos indicadores de calidad del agua.
5. Validación de las fichas realizadas. Orientación y discusión para proseguir con el análisis de los casos de una manera homogénea y contrastada.

FASE 4 INFORME FINAL

Durante esta fase, en base a la información recaudada en las fases dos y tres, se procedió a completar las fichas, sintetizar la información de los 10 casos de estudio y obtener conclusiones. Dichas fichas fueron enviadas a los contactos de cada proyecto para su validación.

Finalmente se realizó un análisis cualitativo de los casos de estudio a través de un análisis más integral y exhaustivo. Para ello, el programa de análisis cualitativo MAXQDA fue utilizado para codificar las fichas, generando categorías de subcódigos para los retos, lecciones aprendidas, impactos y sustentabilidad de los casos. Esto permitió un análisis deductivo de dichos códigos, completando de manera más profunda y extensa la información de cada caso de estudio, a modo de sintetizar, obtener conclusiones y extraer lecciones aprendidas de los 10 casos.

⁴ Software para análisis de datos cualitativos como textos, entrevistas y transcripciones.

5 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS CASOS

CASO 1 ANTOFAGASTA

1. INFORMACIÓN GENERAL



Localización: Antofagasta

País: Chile.

Lugar: Antofagasta, sector industrial de Salar del Carmen-La Negra.

Contexto de reúso: Industrial.

Usuario final: Minería de Antofagasta.

Volumen promedio tratado: 86 400 m³/día (pretratamiento), 76 032 m³/día volcados al effluente emisario marino, y 10 368 m³/día llevados a tratamiento secundario para reúso.

Organización operativa: Asociación público-privada; Econssa Chile S.A. y SEMB-CORP. Contrato BOT 1994-2024.

Año de inicio de construcción: 1968.

Año de inicio de la renovación: 1994.

2. CONTEXTO

Figura 2: Planta de tratamiento de Antofagasta



Fuente: ECONSSA Chile

La ciudad de Antofagasta, ubicada en el norte de Chile, ha presentado en el último tiempo un crecimiento demográfico exponencial, debido al aumento de la oferta laboral en la industria minera, mostrando un crecimiento poblacional del 53,4 % en los últimos 15 años (INE, 2017). Así mismo, en los últimos años, la región de Antofagasta ha sido declarada zona árida, teniendo una fuerte dependencia en procesos de desalinización⁵ para abastecer la demanda de agua, cuyos principales destinatarios son la industria minera y agropecuaria (Econssa, 2021).

La actual PTAR de Antofagasta, construida en 1971 y renovada en 1994, cuenta con un sistema de lodos activados y desinfección por cloro, con una capacidad de pretratamiento de 86 400 m³/día —la totalidad de las aguas servidas recolectadas de Antofagasta— y de 10 368 m³/día para tratamiento completo. El caudal que no es tratado de forma secundaria es vertido al mar a través de un emisario submarino (Econssa, 2021).

⁵ La planta desalinizadora de ósmosis inversa ubicada en La Chimba abastece el 50 % de la demanda de la ciudad, mientras que el otro 50 % es abastecido por fuentes de agua superficiales como el río Loa y la laguna Miscanti.

CASO 1 ANTOFAGASTA

Con respecto a su reúso, inicialmente, las aguas tratadas de Antofagasta se destinaban al riego agrícola. Sin embargo, a la fecha, las mismas son reusadas, en su mayoría, por industrias dedicadas a la elaboración de productos de cobre y zinc (Econssa, 2021). Actualmente, se está licitando la construcción de una nueva planta de tratamiento que reemplace a la actual, con la intención de: (i) aumentar la disponibilidad de aguas de reúso de 10 368 m³/día a 77 760 m³/día; (ii) disminuir la contaminación marina generada por el emisario; y, (iii) contribuir al desarrollo productivo de las industrias.

3. MOTIVADORES PARA EL REÚSO DEL AGUA TRATADA

De acuerdo con Econssa (2013), el reúso de agua tratada en la región de Antofagasta se encuentra motivado por los siguientes factores:

- Hacer frente a la escasez de recursos hídricos y al aumento en la demanda de agua industrial y consumo humano, evitando potenciales conflictos por derechos del agua entre la sociedad civil y las industrias.
- Mejorar la calidad de agua de mar y reducir la explotación de aguas subterráneas. Este aspecto se verá mejorado, aún más, gracias a la nueva planta prevista, disminuyendo las descargas del emisario submarino de la PTAR existente y aumentando el caudal de agua tratada para reúso.
- Ofrecer una alternativa más económica a la desalación, la cual presenta un coste energético muy elevado. Además, la alternativa de reúso es atractiva a largo plazo, ya que disminuye los costos de inversión de disposición y abastecimiento (CPI, 2018; Econssa, 2013).

4. OPERACIÓN

A la fecha, la PTAR trata un caudal promedio de 86 400 m³/día a nivel primario, de los cuales, 10 368 m³/día son tratados a nivel secundario para reúso. La calidad demandada por las industrias que reúsan el agua tratada no requiere de un tratamiento terciario sofisticado. Por lo tanto, el tratamiento de la PTAR consta de un sistema de tratamiento secundario por lodos activados y tratamiento terciario mediante cloración. El objetivo de esta línea de tratamiento es cumplir con la normativa vigente de descarga y cumplir con la calidad demandada por las industrias que reúsan el agua residual tratada. Como se explica en la sección 8, no existe aún legislación vigente para el reúso de agua residual tratada (Econssa, 2013).

Al momento de seleccionar la tecnología de tratamiento, también se consideró la capacidad de control del proceso, la seguridad operacional y la capacidad de respuesta a descargas máximas, sin comprometer la calidad del efluente, es decir, la experiencia práctica en el uso de la tecnología (Econssa, 2013).

Procesos de tratamiento:

El proceso de tratamiento, para reúso, consta de la remoción de residuos de gran tamaño a través de un sistema de rejas finas mecanizadas, y la remoción de arenas y grasas, eliminados por decantación gravitacional y flotación, respectivamente, realizado en estanques aireados. El proceso continúa con la decantación primaria, donde se remueven aproximadamente el 85 % de los sólidos sedimentables, los cuales son enviados a digestores. Luego, se procede al tratamiento secundario, constituido por las cámaras de aireación y los decantadores secundarios. En las cámaras de aireación se produce la oxidación biológica y floculación de la materia orgánica a través de un sistema de lodos activados por aireación extendida. Posteriormente, en los sedimentadores secundarios, los flóculos decan-

CASO 1 ANTOFAGASTA

tan y son recirculados al comienzo de los aireadores o dispuestos residualmente (Lam Esquenazi et al., 2001). Como paso final, las aguas son desinfectadas a través de un proceso de cloración y enviadas por bombeo a la zona de La Negra para su reúso.

Figura 3: Proceso de tratamiento de la PTAR Antofagasta



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Lam Esquenazi et. al., (2001)

El proyecto, además, contempla la construcción de dos tramos soterrados para la conducción de aguas residuales tratadas. El primer tramo recorre desde la nueva PTAR hasta el sector de La Negra, con una longitud de 26 788 m, mientras que el segundo, va desde la PTAR hasta el sector de Mantos Blancos, con un recorrido de 26 605 m.

5. TIPOS DE REÚSO

Las aguas servidas tratadas actualmente, son reusadas en la zona industrial de La Negra, donde tienen sede empresas de fabricación de productos de cobre y zinc, como SQM y Xtrata, principales consumidores del agua de reúso. Con la nueva PTAR, también se prevé abastecer a la industria lanera de Mantos Blancos y el riego de zonas verdes urbanas. Los principales volúmenes entregados son los siguientes:

Tabla 1: Destino de reúso de las aguas tratadas por la PTAR de Antofagasta

Empresa Portuaria de Antofagasta	83 m ³ /día
SKANSKA Chile S.A.	256 m ³ /día
SQM	1 728 m ³ /día
Xtrata (Glencore)	5 996 m ³ /día

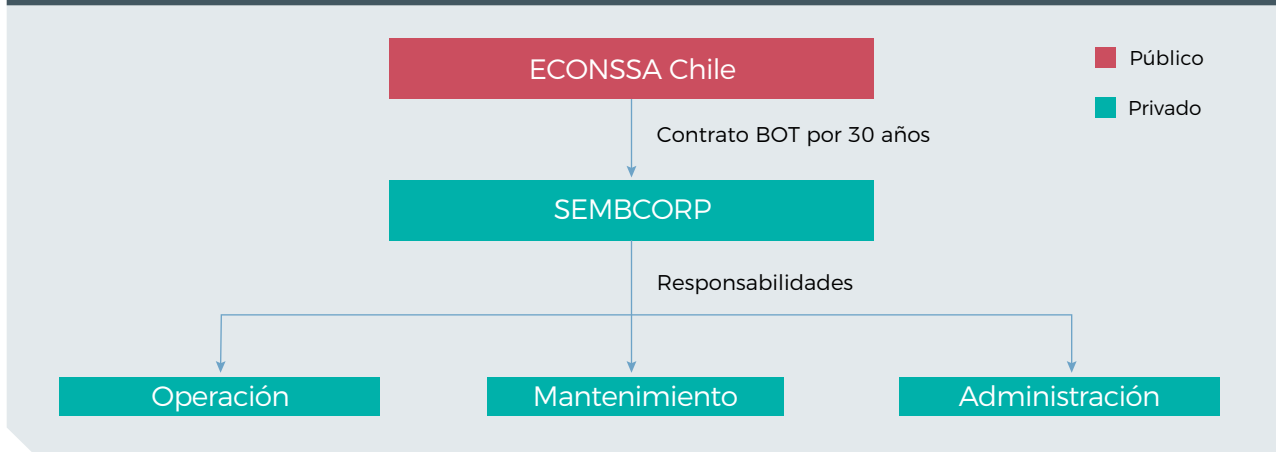
Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Velásquez (2020)

6. GESTIÓN

La gestión de la PTAR es del tipo público-privado. En 1994, ESSAN Chile S.A. (actual Econssa), otorgó a BAYESA S.A. (actual SEMBCORP), la concesión para la construcción, operación y disposición de aguas servidas de la ciudad de Antofagasta por 30 años, a través de un contrato del tipo *Build, Operate and Transfer*. Así, SEMBCORP es el responsable de realizar inversiones para la ampliación de infraestructura, así como de atender las nuevas exigencias de la normativa ambiental (Lam Esquenazi et al., 2001; SEP, s.f.). El contrato también consideró la entrega de la infraestructura sanitaria existente, que, en este caso, era la planta biológica de tratamiento de aguas servidas. El compromiso contractual suscrito tiene fecha de término el 1 de septiembre de 2024 (SEP, s.f.).

CASO 1 ANTOFAGASTA

Figura 4: Esquema de gestión de Antofagasta



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Lam Esquenazi et. al., (2001)

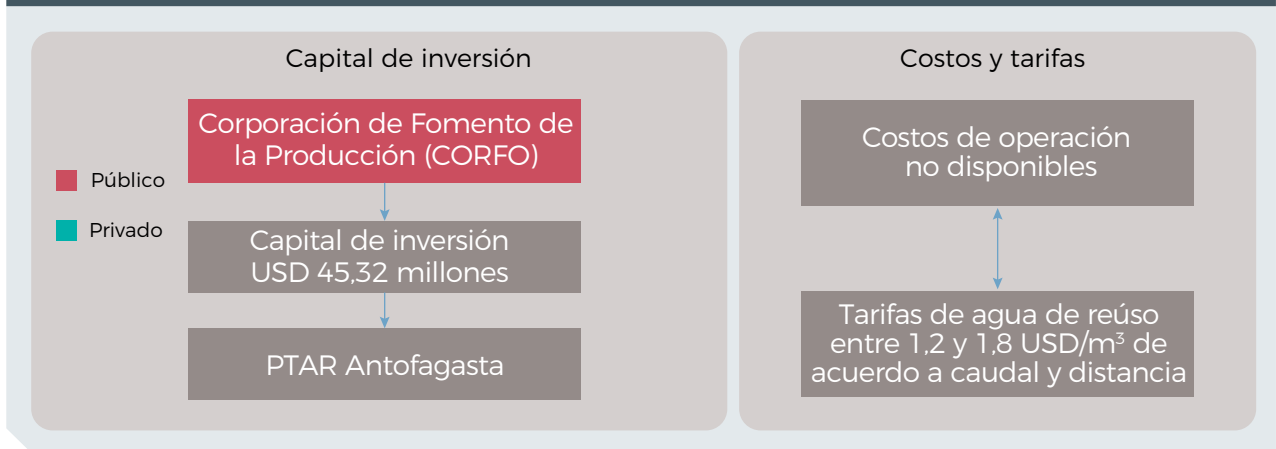
7. INFORMACIÓN ECONÓMICA

En 1968, la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) organizó y aportó el capital necesario para la construcción de la PTAR de Antofagasta. El capital de inversión fue de USD 45,32 millones. Ver figura 5 (Cademartori, J.J., 2007).

Con respecto al sistema tarifario, según cifras de SEMBCORP Utilities S.A., en el sector La Negra el agua tratada se vende entre 1,2-1,8 USD/m³ dependiendo del volumen utilizado y la distancia de impulsión, valor similar al costo del agua potable (1,6 USD/m³). Si bien los costos de agua subterránea siguen siendo considerablemente inferiores (0,6 USD/m³), por razones ambientales, su uso se ha restringido en los últimos años, siendo el agua de reúso, no potable, una opción atractiva, comparada con otras alternativas como el agua de desalación que posee un costo superior a los 2 USD/m³ (Econssa, 2013).

En cuanto a los costos de operación, los mismos no fueron provistos por confidencialidad.

Figura 5: Flujo de capital, PTAR Antofagasta



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Econssa (2013)

CASO 1 ANTOFAGASTA

8. LEGISLACIÓN VIGENTE

En el año 2018, Chile promulgó la ley N° 21 075 referente a la recolección, reutilización y disposición de las aguas grises. Los sistemas de reutilización, previstos por la ley, se enfocan en el tratamiento y reúso exclusivo de las aguas grises, las cuales no podrán ser utilizados para actividades de consumo humano directo (agua potable) o indirecto (riego de frutas y hortalizas). El uso de las aguas grises tratadas, por tanto, está restringido a los usos urbanos, recreativos, ornamentales, industriales y ambientales. En el caso de las aguas negras, la ley no prevé su tratamiento y posterior reutilización. En el caso de Chile, las aguas negras tratadas fueron excluidas de la ley y, por tanto, su reutilización no se encuentra reglamentada hasta el momento.

Además, dicha ley, aún enfrenta desafíos en cuanto a su aplicación. A pesar de su promulgación en 2018, existen retrasos en la aprobación de la reglamentación que detalle los requerimientos técnicos del agua gris tratada. Es por esto que, los sistemas de tratamiento y reutilización de aguas grises tratadas aún no son aplicados de manera sistemática en Chile. Además de los aspectos legales, la implementación de esta ley implicaría la separación de aguas grises y negras, un sistema que no está implementado actualmente en Chile y que implicaría la realización de nuevas inversiones.

9. PRINCIPALES RETOS ENCONTRADOS

- A nivel operacional, la planta actual enfrenta desafíos por la generación de malos olores, situación que fue particularmente problemática en los años 2016 y 2017. Los olores fueron causados por deficiencias operacionales y de mantenimiento, situación que, además, se vio potenciada por deficiencias en el cumplimiento del cronograma de obras de mantenimiento de la planta (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2019).
- En cuanto a las tarifas, los costos del agua tratada siguen siendo casi tres veces mayor a los de las aguas subterráneas. Sin embargo, en los últimos años, a raíz de las restricciones al uso de agua subterránea, se ha promovido el uso del agua tratada frente a otras fuentes, a pesar de su costo más elevado.

10. LECCIONES APRENDIDAS

- Una situación de escasez de los recursos hídricos, como el que presenta el área de Antofagasta, ofrece una ventana de oportunidad al desarrollo de alternativas de reúso del agua.
- En el caso particular de Antofagasta, se demostró que las acciones público-privadas permiten, muchas veces, facilitar la comunicación con los beneficiarios, mediante la socialización técnica de los proyectos, además de los beneficios que comúnmente ofrece el involucramiento del sector privado en este tipo de proyectos.
- La experiencia de reúso actual muestra un creciente interés en el reúso de las aguas servidas al presentar mayor seguridad de suministro, lo que conlleva un mayor apoyo institucional en el proceso de aprobación. En Chile, el reúso de efluentes debería ser una política de Estado. Sin embargo, entre tanto, las empresas privadas pueden tomar la iniciativa en promover este tipo de proyectos y mirar al reúso como una inversión, con la posibilidad de recuperación de costos (CPI, 2018).
- Es importante continuar con los mecanismos de control de calidad de los efluentes, para cumplir con las normativas vigentes que, a pesar de permitir el vuelco al mar, establece límites de calidad del efluente de vuelco. Esto es de vital importancia, en el caso de Antofagasta, donde todavía la mayor parte del agua recolectada es pretratada y volcada al mar.

CASO 2 AQUAPOLO AMBIENTAL

1. INFORMACIÓN GENERAL



País: Brasil.

Lugar: São Paulo.

Contexto de reúso: Industrial.

Usuario final: Industrias de la zona petroquímica de la región ABC Paulista.

Capacidad de tratamiento promedio: 86 400 m³/día.

Organización operativa: Asociación público-privada; GS INIMA y SABESP. SPE Aquapolo Ambiental.

Año de inicio del proyecto: 2009.

Año de inicio de operación: 2012.

2. CONTEXTO

Figura 6: PTAR Aquapolo



Fuente: SABESP

La región industrial ABC es una región formada por siete municipios de la zona metropolitana de São Paulo, que cuenta con una población de 2 825 048 habitantes (Consortio ABC, 2021). Recientes estudios, han mostrado que la región ABC es afectada por un creciente estrés hídrico. Actualmente, la Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp) trata 3,3 millones de m³/día, representando un 77 % de las aguas recolectadas y, para hacer frente a la situación de escasez, la empresa estatal cuenta con plantas propias donde se produce agua residual tratada, que es usada para consumo interno o externo, con un promedio de 43 372 m³/día (Sabesp, 2021; Arsesp, 2021).

⁵ Santo André, São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul, Diadema, Mauá, Ribeirão Pires y Rio Grande da Serra.

⁶ Plantas Jesús Netto, Barueri, Parque Novo Mundo y São Miguel.

CASO 2 AQUAPOLO AMBIENTAL

En este contexto, de alta competencia por el agua entre un gran número de industrias y la creciente población, se concibió Aquapolo, uno de los proyectos más grandes de reúso en la región por su capacidad de producción de 1 m³/s. El proyecto comenzó en 2009, cuando Odebrecht S.A. y Sabesp se unieron para formar la empresa de propósito especial llamada Aquapolo Ambiental S.A., debido al gran interés del complejo petroquímico de Capuava de contar con un suministro de agua confiable y de buena calidad para su actividad industrial⁹. Actualmente, Aquapolo recibe 56 160 m³/día directamente de la planta de tratamiento ABC, propiedad de Sabesp, con el objetivo de realizar un tratamiento adicional y posterior venta a las industrias del complejo (Aidis, 2016). El contrato de venta de agua tratada fue firmado entre Aquapolo Ambiental S.A. y Braskem S.A., empresa que lidera un grupo formado por cuatro empresas más y que representan diez plantas del complejo industrial.

3. MOTIVADORES PARA EL REÚSO DEL AGUA TRATADA

De acuerdo con Aquapolo (2019), la creación de la empresa y la construcción de la planta de tratamiento se motivó en los siguientes aspectos:

- Cubrir las necesidades de suministro de agua del complejo petroquímico de Capuava, en cantidad y calidad garantizadas.
- Incrementar la disponibilidad de agua en la región ABC Paulista que, actualmente, sufre estrés hídrico, liberando agua potable a la población.
- Contribuir a la permanencia y crecimiento de industrias en la región ABC Paulista mediante un incremento del agua disponible.

4. OPERACIÓN

Proceso de tratamiento:

En Brasil no existe, hasta el momento, una regulación específica para la calidad de aguas de reúso en el sector industrial, por ello, únicamente es necesario cumplir con los estándares redactados en el convenio con el cliente. Para cumplir con los requisitos de calidad de agua industrial (remoción de nitrógeno, materia orgánica, sólidos y turbidez), y teniendo en cuenta las características del efluente tratado, se decidió utilizar como tecnología un biorreactor terciario con membranas de ultrafiltración sumergidas (MBR) y sistema de membranas de ósmosis inversa (Aquapolo, 2019). Estas tecnologías elegidas son las que se consideraron más costo-efectivas para cumplir con dichos parámetros de calidad.

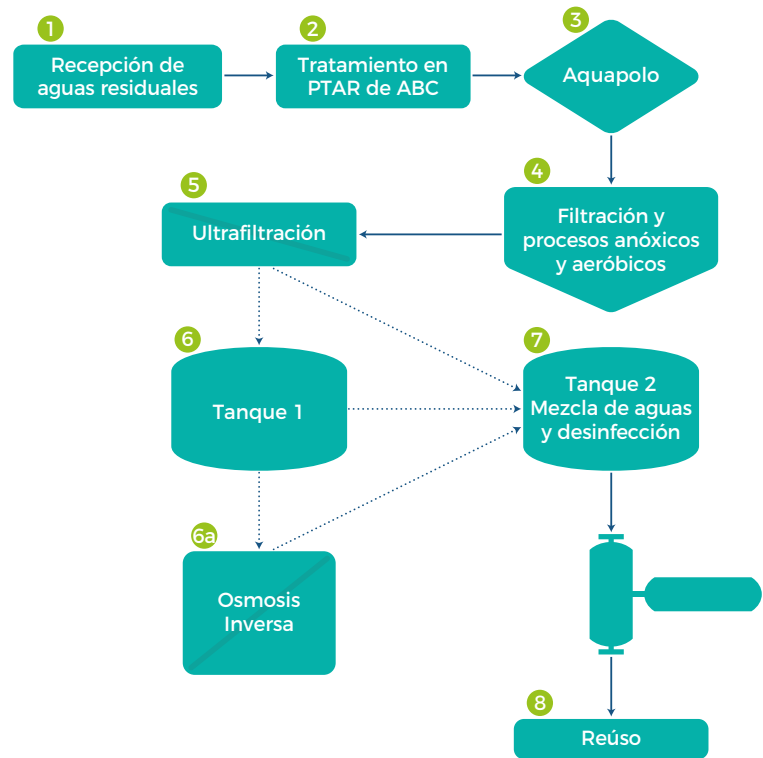
⁹ El complejo Capuava es dirigido por Braskem, la mayor empresa petroquímica de América Latina.

CASO 2 AQUAPOLO AMBIENTAL

Después de ser tratado en la PTAR ABC, el efluente tiene los parámetros de calidad necesarios para ser enviada a Aquapolo, para el tratamiento terciario. Como primer paso, el efluente pasa por la operación de filtración unitaria a través de una batería de filtros, tipo disco, para luego eliminar el amoníaco, el fósforo y la materia orgánica del efluente, en el reactor anaeróbico y aeróbico.

Posteriormente, el efluente se bombea a los MBR terciario que permite obtener la calidad necesaria para su uso directo en procesos industriales. Luego, la monitorización en línea determina, en base a su conductividad, si el agua necesita pasar por un proceso adicional de tratamiento. En caso de que la conductividad sea alta, el agua se envía a un proceso de ósmosis inversa para eliminar las sales minerales. Si la ósmosis inversa no es necesaria, el agua de ultrafiltración se almacena en el tanque 2 (ver figura 7). El proceso finaliza con una desinfección con dióxido de cloro, mediante el cual, el agua alcanza la calidad acordada en el contrato con los clientes de Aquapolo (Aquapolo, 2019).

Figura 7: Proceso operativo de la PTAR Aquapolo



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Aquapolo (2019)

En cuanto al transporte del agua residual tratada, la misma es bombeada a través de una red de 17 kilómetros de longitud, que pasa por los municipios de São Paulo, São Caetano do Sul y Santo André, hasta el centro petroquímico, donde se ubican los usuarios del agua de reúso.

4. OPERACIÓN

El agua tratada se reutiliza en el sector industrial. El complejo petroquímico de Capuava está compuesto por 11 industrias que fabrican productos petroquímicos, materia prima esencial para la producción de resinas, cauchos, pinturas y plásticos. Las empresas de la zona petroquímica de la región ABC utilizan el agua de reúso principalmente para limpiar las torres de refrigeración y para el funcionamiento de las calderas (Aquapolo, 2019).

Las industrias adheridas al contrato de reúso de agua residual tratada son: Braskem (4 industrias que consumen alrededor del 80 % del agua); White Martins Capuava; White Martins Mauá; Oxicap; Oxiteno Petroquímica e Química; Cabot; y, recientemente, Paranapanema y Bridgestone, ubicadas a lo largo del acueducto en el municipio de Santo André; ver Tabla 2.

CASO 2 AQUAPOLO AMBIENTAL

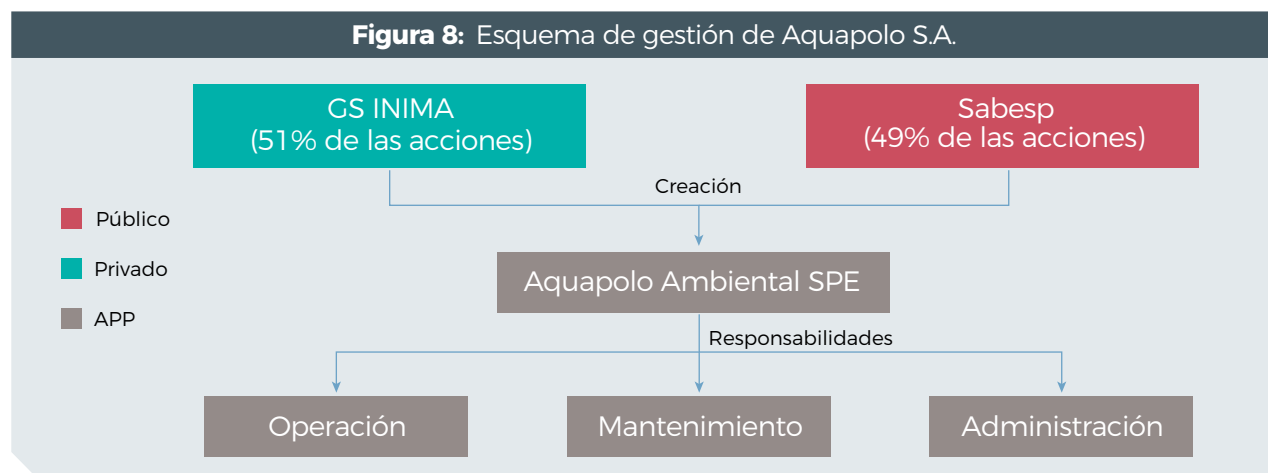
Tabla 2: Caudal contratado por cada empresa (l/s)

Cliente	Valor contratado (l/s)
Braskem	537
Oxiteno	44
Cabot	18
Oxicap	10
White Martins	9
Paranapanema	6
Bridgestone	26
Total	650

Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Aidis, 2016

6. GESTIÓN

La gestión de la planta es del tipo asociación público-privada, donde Aquapolo es una sociedad de propósito específico, formada en 2009 por Odebrecht Ambiental, propietaria del 51 % de las acciones (las cuales fueron vendidas a GS INIMA); y la Sabesp, propietaria del 49 % restante (Aquapolo, 2019).



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Aidis (2016)

En el marco de este proyecto, existen dos acuerdos contractuales. El primero es el acuerdo firmado entre Aquapolo y Braskem S.A., que contempla el 65 % del agua producida en la planta, en el cual Aquapolo se compromete a proporcionar un suministro mínimo de 25 920 m³/día a la empresa. Este contrato garantiza ingresos para Aquapolo hasta el año 2043, haciendo posible su funcionamiento (Aidis, 2016). A su vez, existe un segundo contrato de suministro de agua tratada entre Sabesp y Aquapolo, por 86 400 m³/día, el cual se adhiere a los criterios de calidad y cantidad especificados en el contrato con Braskem. El contrato con Sabesp fue realizado con el fin de suministrar la cantidad de agua residual tratada que Aquapolo necesita para satisfacer las necesidades de sus clientes. En caso de existir un excedente, Aquapolo puede suministrar a nuevos clientes, siempre y cuando sea dentro de la región ABC de São Paulo. En este caso, normalmente se define un tipo de contrato take or pay para cada cliente y se establece una tarifa específica para cada uno, basada en la inversión requerida para la conexión, el plazo del contrato y el flujo mínimo de agua a abastecer.

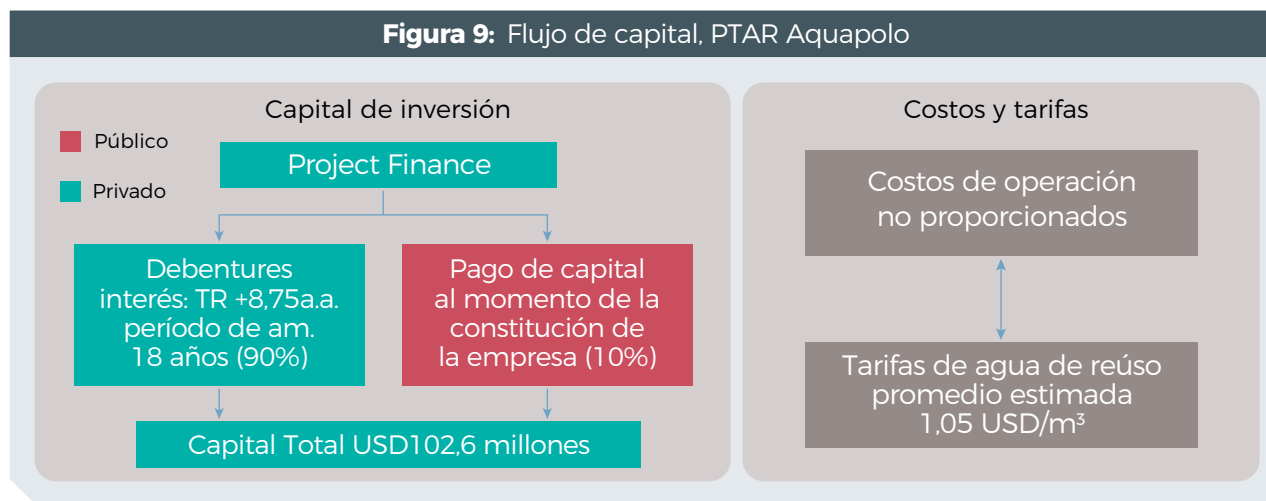
CASO 2 AQUAPOLO AMBIENTAL

7. INFORMACIÓN ECONÓMICA

El capital total de inversión fue de USD 102,6 millones. La PTAR se estructuró con una modalidad de project finance, junto con el Fondo de Inversión del Fondo de Indemnización por Cesantía (FI-FGTS, por sus siglas en portugués)¹² de la Caixa Econômica Federal, mediante una emisión privada de obligaciones simples no convertibles en acciones. Dicha emisión se produjo en una única serie, con una garantía real representada por una cesión fiduciaria de créditos y una disposición fiduciaria de acciones por una cantidad de USD 92 millones, equivalente al 90 % del valor total de la inversión del proyecto. Este valor fue obtenido sin el aval o la garantía de los accionistas. Por su parte, los accionistas invirtieron el 10 % del valor restante, mediante el pago de capital al momento de la constitución de la empresa (Aidis, 2016).

Aquapolo es sostenible financieramente y no cuenta con subsidio de ningún tipo. En cuanto a la estructura tarifaria, es importante destacar que no existe una tarifa única, sino que se determina para cada cliente, tomando en cuenta el plazo del contrato, el volumen y el costo de la inversión al inicio del proyecto (Retema, 2021). Se estima que la tarifa abonada por las empresas provistas por Aquapolo es de un tercio del valor de agua potable para uso industrial (Aidis, 2016). De acuerdo con valores de la Agencia Reguladora de Saneamiento y Energía del Estado de São Paulo (Arseps, por sus siglas en portugués), el valor de agua potable para uso industrial en la región de São Paulo es de 3,13 USD/m³, y se estima que la tarifa para el agua tratada es de alrededor de 1,05 USD/m³ (GUJSP, 2021).

En cuanto a los costos de operación, no fueron provistos por confidencialidad.



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Aidis (2016) y GUJSP (2021)

8. LEGISLACIÓN VIGENTE

Con respecto al reúso de agua residual tratada, en Brasil se emitió la resolución N° 54 promulgada en el 2005, la cual establece los destinos permitidos para la reutilización de esta. El agua residual tratada puede ser utilizada con fines: (i) urbanos, como riego y lavado de lugares públicos; (ii) ambientales, como la recuperación del medio ambiente; (iii) agrícolas y cultivos forestales; (iv) industriales; y, (v) acuicultura, para el cultivo de flora y fauna acuática.

¹² El FI-FGTS tiene como objetivo facilitar la valoración de cuotas, mediante la aplicación de sus recursos en la construcción, rehabilitación, ampliación o ejecución de proyectos de infraestructura en carreteras, puertos, vías navegables, ferrocarriles, aeropuertos, energía y saneamiento. Es gestionado por Caixa Econômica Federal (Banco de Fomento Público).

CASO 2 AQUAPOLO AMBIENTAL

Similar al caso de Chile, esta resolución no especifica los estándares de calidad requeridos y no se encuentra reglamentada con información específica para su implementación. Además, al tener carácter de resolución, su peso específico dentro de la legislación brasileña es menor frente a una ley, lo cual retrasa su reglamentación y puesta en efecto. Cabe destacar, además, que esta resolución no regula las reutilizaciones realizadas de manera privada, sino que, en dichos casos, la reutilización es analizada y aprobada por autoridades competentes.

9. PRINCIPALES RETOS ENCONTRADOS

Los principales retos encontrados fueron:

- Aquapolo ha declarado que, inicialmente, no fue sencillo establecer una relación comercial con la Sabesp, encargados de la venta de agua tratada a Aquapolo, ya que los mismos percibían a la nueva empresa como un competidor y no como un colaborador.
- Representó un reto identificar la tecnología adecuada para reducir la salinidad aportadas a las aguas residuales por las industrias en la región ABC que se tratan en Aquapolo.
- Significó un reto poder cumplir con los eco-indicadores de eficiencia energética debido a los altos consumos de energía de los procesos de ósmosis inversa.

10. LECCIONES APRENDIDAS

- Dificultad de construir y operar un proyecto innovador, especialmente, cuando el consumidor se caracteriza por ser una industria de fabricación con alta demanda en calidad y cantidad de agua. Esto generó, al principio, impactos económicos en la operación, debido al tiempo requerido por parte de Sabesp, encargado de suministrar el agua, para adaptarse a un proyecto de este tipo y cumplir con la calidad requerida por Aquapolo para sus operaciones.
- Falta de incentivos públicos para la participación privada: En términos generales, proyectos como Aquapolo requieren de incentivos públicos, ya sean a través de políticas públicas o financiación, o al menos mediante acciones que no impidan el reúso. En este sentido, Aquapolo espera la implementación de un marco regulatorio y normativo para la reutilización del agua, que potencie y facilite el apoyo del mercado a proyectos de reúso de aguas residuales tratadas.
- Oferta y demanda: Es importante tener la demanda asegurada para justificar la construcción de la planta, considerando un retorno a largo plazo. A su vez, también es un factor clave, asegurarse la suficiente generación de materia prima, es decir, efluentes domésticos e industriales, así como considerar la inversión en infraestructura necesaria para la recolección y transporte hacia los consumidores.
- Replicabilidad: Aquapolo es replicable en cualquier región con características similares respecto del tipo de usuario final y característica de los efluentes. Es importante, sin embargo, considerar la cercanía de la PTAR al usuario final para reducir costos, tanto en la construcción como en la tarifa. En caso de replicar la experiencia, es importante evaluar las características físicas y químicas de los efluentes, ya que pequeñas variaciones pueden impactar el proceso operativo, como fue la conductividad de los efluentes en el caso de Aquapolo, situación que llevó a la incorporación del proceso de ósmosis inversa, situación que no estaba prevista en un primer momento.

CASO 3 ATOTONILCO

1. INFORMACIÓN GENERAL



País: México.
Lugar: Atotonilco de Tula, Hidalgo.
Contexto de reúso: Agrícola.
Usuario final: Agricultores del Valle del Mezquital.
Capacidad de tratamiento promedio: 3 024 000 m ³ /día.
Organización operativa: Asociación público-privada: Conagua y Consorcio Aguas Tratadas del Valle de México (ATVM). Contrato BOT 2010-2035.
Año de inicio del proyecto: 2009.
Año de inicio de operación: 2017.

2. CONTEXTO

Hacia fines de los 2000, el Valle del Mezquital, en el estado de Hidalgo, México, constituía el área más grande en utilizar aguas residuales no tratadas para fines agrícolas en América Latina. Aproximadamente, 65 000 agricultores de la zona regaban sus cultivos con aguas residuales contaminadas con organismos patógenos, productos químicos tóxicos y metales pesados, situación que suponía un riesgo de salud, tanto para los agricultores como los consumidores de los productos derivados (Jiménez y Asano, 2008; World Bank Group, 2018). Por ello, en 2007, el gobierno mexicano lanzó el Programa Sustentabilidad Hídrica de la Cuenca del Valle de México (PSHCVM) a través de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), para hacer frente a la problemática de las aguas residuales no tratadas de la zona metropolitana del Valle de México¹³ (Yitani et al., 2019).



Figura 10: PTAR Atotonilco

Fuente: Fondo Nacional de Infraestructura (FONADIN)

¹³ La zona metropolitana del Valle de México es el área metropolitana formada por la Ciudad de México y por 50 municipios conurbados o aglomerados, uno de ellos en el estado de Hidalgo, los restantes en el estado de México.

CASO 3 ATOTONILCO

La PTAR de Atotonilco, cuya operación inició en 2017, está diseñada para tratar alrededor del 60 %¹⁴ de las aguas residuales generadas en la zona metropolitana del Valle de México, constituyendo la mayor PTAR, del mundo, construida en una sola fase, y la tercera del mundo en capacidad de tratamiento (World Bank, 2018a). La puesta en marcha de la PTAR Atotonilco transformó al Valle del Mezquital en una de las zonas, en el mundo, con el mayor uso de aguas residuales tratadas en el sector agrícola (García-Salazar, 2019).

3. MOTIVADORES PARA EL REÚSO DEL AGUA TRATADA

Frente a la situación crítica del Valle del Mezquital, el gobierno mexicano promovió la construcción de la planta de Atotonilco con el objetivo de:

- Mejorar las condiciones de calidad del agua generada en la zona metropolitana del Valle de México y distritos aledaños, para su posterior reúso en la industria agrícola, buscando cumplir con la calidad requerida por la normativa vigente y permitir el cultivo de productos restringidos por ser regados con agua residual tratada, beneficiando a más de 700 000 personas.
- Disminuir la sobreexplotación de los acuíferos del valle, mediante la sustitución del consumo de agua de pozo por agua reutilizada en los sectores industriales y agrícolas.
- Disminuir el deterioro paisajístico y la contaminación de los cauces del río Tula, así como contribuir a la restauración ecológica de la presa Endhó (Nava Trviño, 2013; Yitani et al., 2019).
- Reducir el riesgo sanitario de la población y los costos secundarios asociados como, por ejemplo, para el tratamiento de enfermedades ocasionadas por la ingesta directa de agua sin tratamiento o el consumo de productos regados con aguas residuales sin tratar, y la pérdida de jornadas laborales, entre otros (Yitani et al., 2019).

4. OPERACIÓN

La planta de Atotonilco utiliza una combinación de dos procesos de tratamiento de aguas residuales, dependiendo del origen y uso final de las aguas residuales, siendo este, uno de los aspectos más innovadores de la planta, permitiendo optimizar recursos y reducir significativamente los costos operativos. Los dos procesos de tratamiento son: (i) un proceso fisicoquímico, basado en un tratamiento primario químicamente mejorado para limpiar el caudal de aguas pluviales; y, (ii) un tratamiento biológico de lodos activados de alta velocidad para el flujo de aguas residuales, para su reutilización en riego (Agua, 2019; World Bank, 2018a). El caudal promedio tratado es de 3 024 000 m³/día.

La selección del tipo de tratamiento se enfocó en cumplir con la NOM-001-SEMARNAT-1996 de calidad de agua de la manera más eficiente, barata y sostenible posible, considerando el gran volumen de agua por tratar y contrastando con los costos de otros métodos. La decisión de no incluir tecnologías para remover el nitrógeno o el fósforo se debió a que los agricultores solicitaron “mantener la carga” de nutrientes en el agua de riego (Macias Melken, 2020).

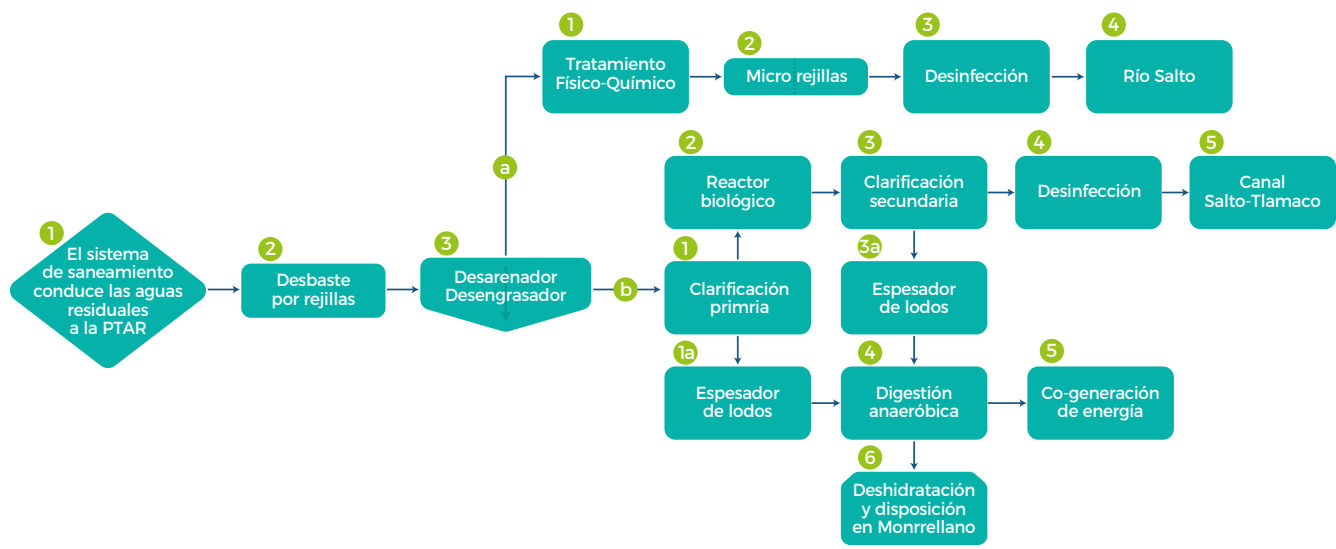
¹⁴ Existen 138 PTAR en diferentes estados de operación y faltan por construir 5 PTAR, para tratar la totalidad de las aguas residuales del Valle de México, según las últimas fuentes aportadas por SEMARNAT y Conagua.

CASO 3 ATOTONILCO

En el proceso de estabilización de lodos, en los digestores anaeróbicos, se genera biogás, que se utiliza para la producción de electricidad para autoconsumo (60 % de las necesidades de la planta) incluyendo el calentamiento de los digestores, minimizando los costos de energía y mejorando la eficiencia energética. Además, al capturar metano, la planta reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que le permite obtener y monetizar créditos de carbono. Por otra parte, el lodo estabilizado producido cumple con los estándares de la NOM-004-SEMARNAT-2002, para su aplicación en bosques, mejoramiento de suelos y agricultura. Por último, la planta utiliza agua residual tratada para la operación de la planta, reduciendo el uso de agua potable en un 93 %. El agua residual tratada es utilizada para todos los procesos de tratamiento de la planta exceptuando las pruebas de incendio y los servicios generales (Bello, Contreras y Rodríguez, 2016).

En cuanto a la conducción, las aguas residuales son conducidas desde la zona metropolitana del Valle de México por el Túnel Emisor Oriente (TEO) y el Túnel Emisor Central (TEC) hasta la PTAR. El efluente tratado biológicamente es descargado al canal Salto-Tlamaco donde se aprovecha para riego agrícola o devuelto al río El Salto.

Figura 11: Proceso operativo de la PTAR Atotonilco



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Agua (2019)

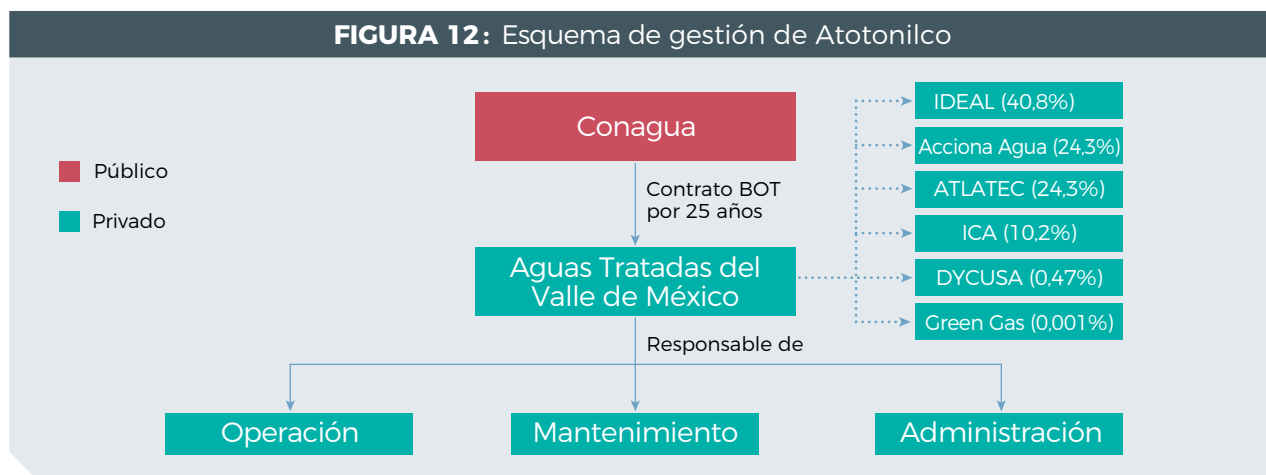
5. TIPOS DE REÚSO

Previo al momento de la construcción, las aguas residuales eran utilizadas directamente por los agricultores del Valle del Mezquital para regar 80 000 hectáreas de cultivos; siendo los principales productos regados maíz y alfalfa. Con la construcción de la planta, los agricultores accedieron al beneficio del riego no restringido de otros productos agrícolas como, por ejemplo, hortalizas, permitiendo diversificar los cultivos (BID, 2019; García-Salazar, 2019). Por otro lado, los biosólidos generados en la PTAR son reutilizados para la fertilización de cultivos agrícolas, al cumplir con la normativa NOM-004-SEMARNAT-2002, en su categoría C, para la aplicación en espacios forestales, agrícolas y mejoramiento de suelos (Macías Melken, 2020).

CASO 3 ATOTONILCO

6. GESTIÓN

La gestión es del tipo público-privada. En 2009, el Gobierno de México, a través de la Conagua, adjudicó el contrato de diseño, construcción, operación y mantenimiento de la planta de tratamiento, al consorcio de Aguas Tratadas del Valle de México (ATVM) durante 25 años (Yitani et al., 2019); ver figura 12.



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Yitani et al., (2019)

El proyecto formó parte del Programa de Sustentabilidad Hídrica del Valle de México, un plan integral de abastecimiento, distribución y saneamiento de las aguas residuales del Valle de México impulsado por la Conagua.

7. INFORMACIÓN FINANCIERA

El capital de inversión requerido para la construcción de la planta fue de USD 686 millones (World Bank, 2018a). La fuente de financiación fue, en un 49 % pública, a través de una subvención de capital del Fondo Nacional de Infraestructura (FONADIN), y en un 51 % privado. Lo particular, del caso de Atotonilco, es que FONADIN normalmente subvenciona proyectos hasta en un 40 % de los costos de las APP. En este caso, sin embargo, el umbral se elevó al 49 %, debido al tamaño del proyecto y las tarifas relativamente bajas cobradas a los usuarios del agua. De la inversión privada, el 39 % fue capital de riesgo propio del inversionista, y el 61 % crédito aportado por Banobras, liderando el financiamiento de la deuda a través del fideicomiso que administra los recursos del proyecto (Yitani et al., 2019).

La estructura tarifaria de saneamiento, por su parte, se rige por el principio de “quien contamina paga”, por lo que el costo recae en la factura de los consumidores de los municipios (Diputados, Congreso de la Unión, 2008) la cual, según datos oficiales aportados de la Conagua, es de 0,97 USD/m³ para uso doméstico tipo residencial en la Ciudad de México. Los usuarios del agua de reúso, no abonan tarifa alguna por su utilización. Por otra parte, el costo de tratamiento estimado de la planta es de 0,092 USD/m³ (GIZ, 2016).

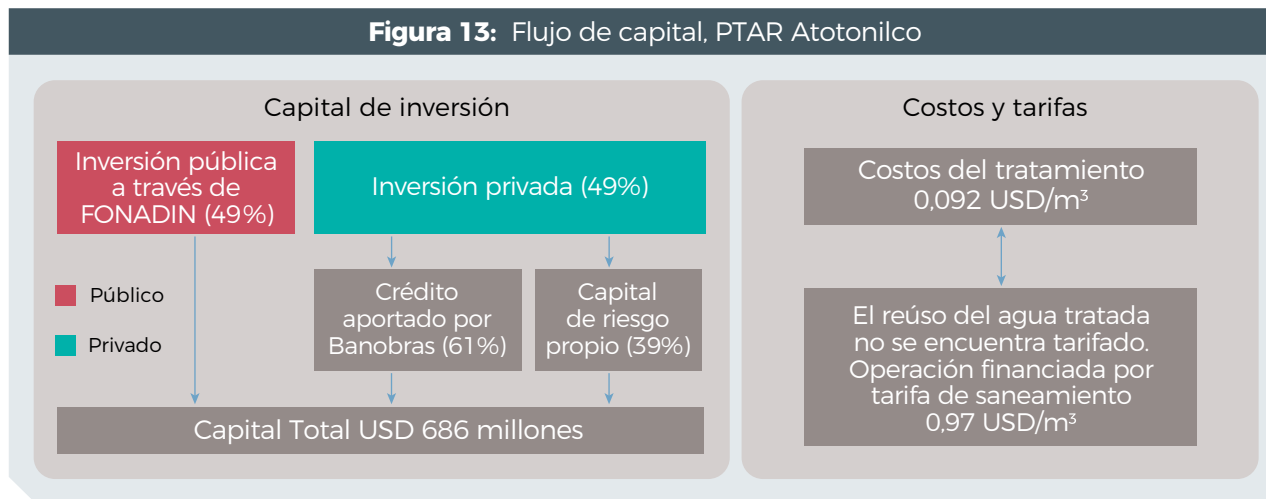
¹⁵ FONADIN es el vehículo de coordinación del Gobierno de México para el desarrollo de infraestructura, principalmente en las áreas de comunicaciones, transportes, hidráulica, medio ambiente y turística.

¹⁶ Banco de Desarrollo del gobierno mexicano.

¹⁷ Conagua (2018) Tarifas (nacional). Disponible en: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=tarifas> (Acceso: 28 abril 2020).

CASO 3 ATOTONILCO

Figura 13: Flujo de capital, PTAR Atotonilco



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Yitani et. al., (2019)

8. LEGISLACIÓN VIGENTE

México, a través de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, promulgada en 1998, establece las condiciones para el reúso de agua residual tratada, permitiendo la reutilización de las mismas para la industria y la agricultura, bajo distintos niveles de tratamiento.

Para su correcta regulación, el Estado mexicano promulgó la norma NOM-001-SEMARNAT-1996, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, en aguas y bienes nacionales, aspecto clave para este proyecto, tomando en cuenta que los agricultores se benefician de estas aguas. Un año después, el Estado mexicano promulgó la norma NOM-003-SEMARNAT-1997, que diferencia los distintos tipos de reúso posibles entre contacto humano directo, indirecto u ocasional, estableciendo distintos límites de los parámetros de calidad para cada uno. La norma considera actividades de contacto directo con el usuario: llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí; fuentes de ornato, lavado de vehículos y riego de parques y jardines. Por otro lado, la norma entiende como actividades de contacto indirecto u ocasional: riego de jardines y camellones en autopistas, camellones en avenidas, fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes de sistemas contra incendio, lagos artificiales no recreativos, barreras hidráulicas de seguridad y panteones.

9. PRINCIPALES RETOS ENCONTRADOS

De acuerdo con los informes de Yitani et al. (2019) y Macias Melken (2020), los principales retos encontrados fueron retrasos en la construcción, debido a distintos factores que se listan a continuación:

- Conflictos sociales derivados de disputas territoriales, entre la sociedad civil, las autoridades municipales y la empresa. El conflicto se resolvió parcialmente a través de compensaciones económicas a la comunidad.
- Retrasos en las obras de colectores de las aguas residuales hasta la planta, principalmente el Túnel Emisor Oriente (TEO) que transporta las aguas residuales desde la Ciudad de México hasta la planta de tratamiento, ya que el suelo tenía características distintas a las esperadas.
- La propia magnitud de la obra que, siendo una de las más grandes del mundo, requirió de amplia experticia técnica y tecnológica.


CASO 3 ATOTONILCO

10. LECCIONES APRENDIDAS

- Estructura legal y financiera innovadora: Aspectos como el plazo de concesión (25 años) y el porcentaje de financiación pública (49 %) hicieron de este proyecto una inversión atractiva para los actores privados, reduciendo el riesgo de la inversión.
- Asegurar la calidad requerida para cada uso final: La utilización de un tratamiento característico de acuerdo con el origen y destino del efluente, permite asegurar la calidad requerida a los distintos usuarios, evitando conflictos y el desperdicio de agua tratada.
- Continuidad y transparencia del proceso comunicativo: Es importante una correcta y oportuna comunicación de los beneficios de los proyectos APP y de reúso de las aguas tratadas sobre salud, productividad y medio ambiente. Este proyecto, enfrentó conflictos con agricultores de la zona que temían por un aumento sustancial de la tarifa, así como la falta de agua y de nutrientes para sus plantaciones. Para ello, la Conagua implementó varios espacios de socialización y participación para explicar los beneficios del proyecto.
- Relevancia de considerar el reúso con un enfoque integral: Los objetivos asignados a los proyectos de APP deben ir más allá de la eficiencia técnica y financiera en su ejecución y operación. El proyecto debe tener un enfoque holístico que considere la sustentabilidad socioambiental como, por ejemplo, a través de la generación de biogás a través de la digestión de lodos estabilizados.
- Participación del sector público: La correcta participación y solidez institucional del sector público es crucial en el éxito de grandes proyectos APP, ya que incentiva la participación del sector privado y brinda certeza a los inversionistas, sobre todo en el largo plazo (Yitani et al., 2019).
- Regulación: Son necesarias regulaciones claras que promuevan el uso de efluentes tratados de una manera segura y sustentable.

CASO 4 CERRO VERDE

1. INFORMACIÓN GENERAL



Localización: Cerro Verde

País: Perú.

Lugar: Arequipa.

Contexto de reúso: Industrial (minería) y agricultura.

Usuario final: Uso directo para Sociedad Minera Cerro Verde (SMCV).

Volumen promedio tratado: 155 520 m³/día.

Organización operativa: Asociación público-privada; SEDAPAR Y SMCV. Modelo BOT a cargo de SMCV 2014-2043.

Año de inicio del proyecto: 2008.

Año de inicio de operación: 2016.

2. CONTEXTO

De acuerdo con el censo nacional de 2017, la ciudad de Arequipa cuenta con una población de 1,3 millones de habitantes¹⁸. La misma se localiza en una zona árida del sur del Perú, en la cordillera de Los Andes. Su mayor fuente de agua es el río Chili, donde se descargaban más del 90 % de las aguas residuales de la ciudad, sin tratamiento, generando grandes problemas de contaminación y de salud para la población de Arequipa.



Figura 14: PTAR La Enlozada

Fuente: Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A.

En este contexto, en 2008, la minera SMCV (Sociedad Minera Cerro Verde) construyó la PTAR La Enlozada, con el objetivo de aumentar el volumen de agua disponible para su producción y facilitar la expansión de sus operaciones. Para lograrlo, la planta trata y reusa las aguas residuales de la población de Arequipa, permitiendo además, asegurar la calidad mínima de descarga al río Chili, exigida por la normativa aplicable (World Bank, 2018b).

¹⁸ Instituto Nacional de Estadística e Informática (s.f.) Disponible en: <http://m.inei.gob.pe/prensa/noticias/arequipa-alberga-a-1-millon-316-mil-habitantes-9903/> (Acceso: 19 Mayo 2020).

CASO 4 CERRO VERDE

3. MOTIVADORES PARA EL REÚSO DEL AGUA TRATADA

La motivación principal de la construcción de la planta de tratamiento La Enlozada fue posibilitar la expansión de la actividad minera, sin comprometer el uso del agua del río para consumo humano. Sin embargo, también es importante destacar que el proyecto contempló el tratamiento del 100 % de las aguas residuales de Arequipa, aun cuando el porcentaje de agua utilizada por SMCV es el 55 % (86 400 m³/día), situación que mejoró la salud de la población y favoreció la descontaminación del río Chili (Valverde, 2018; World Bank, 2018b).

4. OPERACIÓN

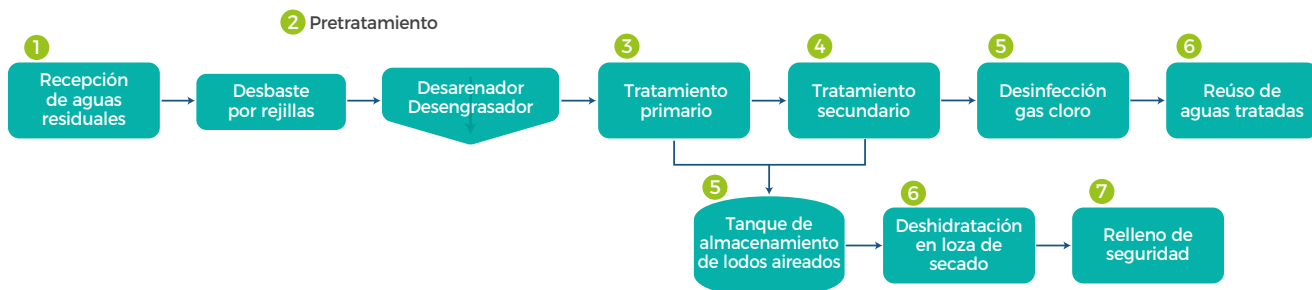
La PTAR está concebida con un horizonte de diseño de 28 años (2015-2043), y tres etapas de construcción. La primera etapa, actualmente en operación, está diseñada para tratar un caudal promedio de 155 520 m³/día, mientras que las otras dos expansiones (2029 y 2036), prevén incrementar el caudal tratado a 181 440 m³/día y 207 360 m³/día, respectivamente. Del total tratado, 86 400 m³ / día se derivan para la actividad minera, mientras que el resto se descarga al río Chili, cumpliendo la calidad exigida por el Ministerio del Ambiente (MINAM). Las actividades industriales, para las que el agua tratada es utilizada, no requieren de un tratamiento terciario, lo cual favorece a los agricultores que se benefician del agua tratada descargada al río, ya que pueden utilizar los nutrientes remanentes en el agua como fertilizante (World Bank, 2018b).

Para la selección de la tecnología, se realizaron estudios preliminares que determinaron, como la mejor alternativa, el tratamiento aeróbico a través de filtros percoladores, acompañado por un pretratamiento y tratamiento primario para eliminar sólidos. La opción de los filtros percoladores fue seleccionada con la intención de reducir el consumo energético, considerando que, por encima de los 2000 m.s.n.m., el nivel de energía necesario para el tratamiento por lodos activados casi se duplica. El tratamiento se completa con una desinfección por medio de dosificación de cloro gas. Por su parte, los lodos retirados de los clarificadores, primarios y secundarios, son llevados a un tanque de almacenamiento de lodos aireados, desde donde se bombean a la zona de deshidratación (Valverde, 2018).

Las aguas residuales son recolectadas por la red de alcantarillado de la ciudad, que cuenta con un sistema de cinco colectores, los cuales derivan la totalidad de aguas residuales hacia la PTAR La Enlozada. Antes del ingreso a la planta, aproximadamente 45 600 m³/día, son descargados al río Chili de manera directa. Por otra parte, las aguas residuales de la mina se recogen y se envían de manera subterránea a las cabeceras de la planta para su tratamiento, evitando así la contaminación del río.

CASO 4 CERRO VERDE

Figura 15: Proceso operativo de la PTAR La Enlozada



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Valverde (2018)

5. TIPOS DE REÚSO

Un caudal de 86 400 m³/día de las aguas tratadas de la PTAR La Enlozada se reúsan en las operaciones mineras de Sociedad Minera Cerro Verde S.A., mientras que los 69 120 m³/día restantes, se descargan al río Chili. Posteriormente, esta agua es aprovechada por los agricultores para el riego de cultivos en la región (World Bank, 2018b).

6. GESTIÓN

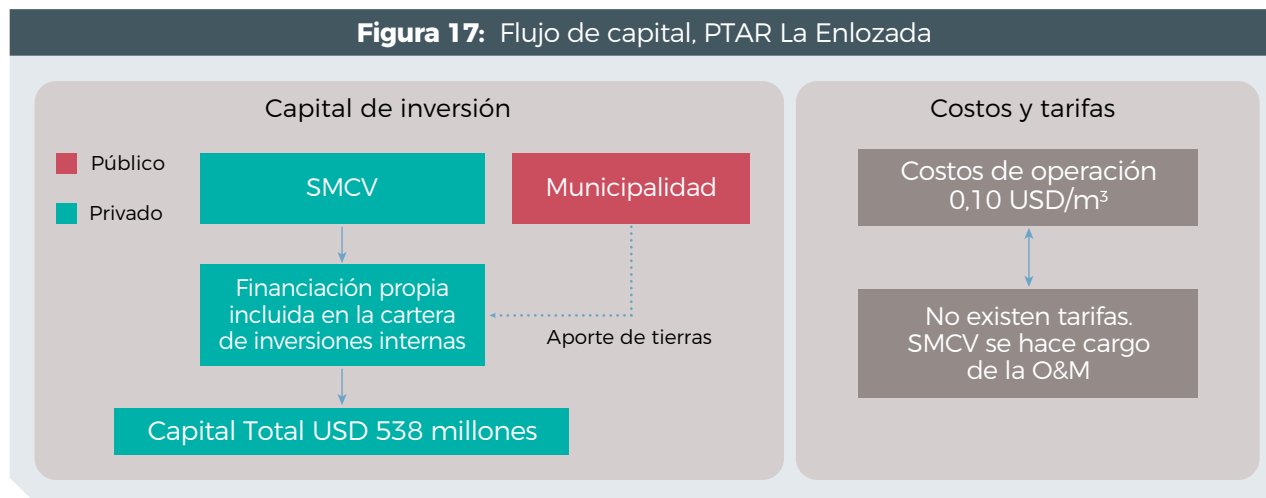
La gestión de la planta es del tipo público-privada por contrato civil, donde SMCV es responsable de la construcción, operación y mantenimiento de la PTAR, adquiriendo a cambio el derecho de usar un promedio de 86 400 m³/día del agua tratada en sus operaciones. Por su parte, el Servicio de Agua Potable y Alcantarillado (SEDAPAR) —empresa pública que administra el sistema de agua potable y saneamiento de la ciudad de Arequipa— es el responsable de la evaluación ambiental de la operación de la planta y el control del agua vertida al río Chili. Por último, las autoridades municipales fueron las responsables de proveer el terreno para la construcción. El convenio firmado, entre ambas empresas, tiene una vigencia de 29 años, a vencer en el 2043, fecha en que la responsabilidad será traspasada a SEDAPAR.



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de SEDAPAR (2016) y World Bank, 2018b

CASO 4 CERRO VERDE

7. INFORMACIÓN FINANCIERA



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Yitani et. al., (2019)

El capital de inversión, para la primera etapa, fue de USD 538 millones, asumidos en su totalidad por SMCV, incluyendo el proyecto en su cartera de inversiones internas, decidiendo financiar el proyecto con sus propios medios para evitar retrasos en la construcción de la planta. Los costos de operación y el mantenimiento se encuentran en el orden de 0,1 USD/m³ y son cubiertos por SMCV hasta el 2043, fecha en la cual serán asumidos por SEDAPAR.

8. LEGISLACIÓN VIGENTE

A través del artículo 82 de la ley N° 29338 (ley de recursos hídricos), Perú establece una normativa para el reúso de agua residual tratada. La autoridad nacional, a través del Consejo de Cuenca, autoriza el reúso del agua residual tratada, según el fin para el que se destine la misma, en coordinación con la autoridad sectorial competente y, cuando corresponda, con la autoridad ambiental nacional.

La norma que rige y controla la calidad del agua tratada de las PTAR municipales con destino a un cuerpo receptor en el Perú, es el D.S. 003-2010-MINAM. Los límites máximos permisibles, para los efluentes de PTAR domésticas o municipales, deben garantizar que no se impacte en la calidad del agua del cuerpo receptor, estipulado por los Estándares de Calidad Ambiental del Agua Superficial. En este sentido, la PTAR La Enlozada tiene una elevada eficiencia, que permite llegar al 97 %, evitando que impacte en la calidad del río Chili, según parámetros de control establecidos.

9. PRINCIPALES RETOS ENCONTRADOS

La construcción de la nueva PTAR encontró cierta resistencia por parte de los agricultores y habitantes de la zona, que desembocó en dos grandes retos:

- Demoras debido a protestas por parte del sector agrícola que reclamaban un descenso en el nivel del agua del río, así como una violación a su derecho al acceso al agua residual para riego, incluso, cuando esta actividad estaba expresamente prohibida por los riesgos para la salud y el medioambiente. El conflicto fue manejado con una comunicación regular y permanente de datos oficiales, por parte de la Autoridad Nacional

CASO 4 CERRO VERDE

del Agua, mostrando: (i) el balance hídrico del sistema regulado del río Chili; (ii) los beneficios de detener el vertido de aguas residuales al río; y, (iii) que las aguas residuales no son parte del volumen de agua disponible para riego, estipulado por la autoridad del agua (World Bank, 2018b).

- Dificultades para encontrar una ubicación adecuada para la planta de tratamiento de aguas residuales. Debido a la oposición de algunos residentes, preocupados por potenciales malos olores; considerando que la SMCV era 100 % responsable de la financiación de la planta, el gobierno municipal cedió un terreno para su construcción (World Bank, 2018b).

10. LECCIONES APRENDIDAS

- Participación proactiva de las partes interesadas: Un factor clave para el éxito de la PTAR La Enlozada fue la generación de una participación efectiva, transparente y continua de las partes interesadas. Para ello, se generó un espacio de participación de las partes afectadas, para identificar problemas percibidos y acordar conjuntamente cómo abordarlos, evitando así, contratiempos en la construcción y operación de la planta.
- Regulación favorable para las APP: Para facilitar que las acciones público-privadas contribuyan a mayores beneficios, son necesarias regulaciones nacionales que brinden un marco de seguridad y transparencia. A partir del caso de la Sociedad Minera Cerro Verde, el gobierno de Perú ha promovido nuevas regulaciones para fomentar la participación privada.
- Adaptación local de la ingeniería: Estudios previos, para la definición de la tecnología apropiada, fueron vitales desde el principio del proyecto. El tipo de tratamiento de la PTAR La Enlozada fue escogida en base a las condiciones locales respecto al tipo de demanda y los parámetros de contaminación elevados de las aguas residuales.
- Éxito de la estructura de la APP: La estructura de la APP no solo redujo la presión económica y financiera sobre los organismos públicos, sino que, en el caso de Arequipa, ayudó a resolver problemas ambientales y de salud. Esta APP presenta ciertas características que la hacen distinta al común de este tipo de asociaciones. En este caso, el privado no ofrece un servicio y participa del riesgo de la PTAR, sino que toma el total de las responsabilidades y costos, a cambio del uso total de las aguas tratadas. Este tipo de APP solo es posible en casos donde el privado tenga su propio interés sobre las aguas tratadas.

CASO 5 MONTERREY

1. INFORMACIÓN GENERAL



País: México.
Lugar: Monterrey.
Contexto de reúso: Urbano (espacios verdes y limpieza de espacios públicos), industrial y agrícola.
Usuario final: Industrias, consumidores urbanos y distritos de riego.
Capacidad de tratamiento promedio: 84 000 m ³ /día.
Organización operativa: Pública, a cargo de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey.
Año de inicio del proyecto: 1995.
Año de inicio de operación: 2000.

2. CONTEXTO



Fuente: Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM)

Monterrey y su área metropolitana, situada en el estado de Nuevo León, México, cuenta con una población de 5 119 504¹⁹ habitantes. La ciudad es considerada la capital industrial del país y se encuentra emplazada en una región caracterizada por un clima semiárido. En este contexto, y ante la creciente demanda, Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM) decidió poner en funcionamiento un esquema de reúso de aguas residuales tratadas. Bajo este esquema de reúso, se encuentran siete de las 52 plantas de tratamiento de aguas, con las que cuenta la ciudad y, por tanto, son caso de estudio de la presente ficha.

En la actualidad, gracias a la ampliación de las plantas Dulces Nombres, Norte y Noreste, el 100 % de las aguas residuales, generadas en la región metropolitana y conurbada de Monterrey, son tratadas en las PTAR a cargo del SADM. Del volumen total tratado (1 072 025 m³/día), las 7 PTAR ligadas al sistema de reúso tratan, en promedio, 622 080 m³/día para uso agrícola y 237 686 m³/día se destinan a la industria, sirviendo a un total de 120 usuarios finales, con tarifas establecidas. Por otra parte, aún existen 126 991 m³/día de agua tratada que no son utilizados en ninguna actividad. El esquema de reúso, por parte del SADM, presenta ciertas particularidades, entre las que se destacan: (i) su dimensión; (ii) el sistema de gestión utilizado; (iii) la calidad de agua entregada y adaptable a las particularidades de cada empresa; y, (iv) la viabilidad financiera del esquema, mediante tarifas suficientes para cubrir los costos del sistema.

¹⁹ Secretaría de Economía y Trabajo. (2020). DATA NUEVO LEÓN | N.L. Población Total y por Municipio. Disponible en: <http://datos.nl.gob.mx/n-l-poblacion-total-y-por-municipio/> (Acceso: 19 mayo 2020).

CASO 5 MONTERREY

3. MOTIVADORES PARA EL REÚSO DEL AGUA TRATADA

El SADM desarrolló su esquema de reúso de aguas tratadas con el objetivo de:

- Disponer de un suministro de agua que no esté condicionado a cambios climáticos y asegure continuidad en un contexto de crecida poblacional, evitando así la sobreexplotación de los acuíferos.
- Proporcionar una alternativa más económica al uso de agua subterránea, la cual implica un tratamiento para reducir su salobridad.

4. OPERACIÓN

El esquema de reúso diseñado por SADM cuenta con más de 300 km de cañerías, que conectan a las 7 plantas de tratamiento en la red de agua residual tratada. Los nombres y caudales de las PTAR se presentan a continuación:

Tabla 3: Las PTAR del sistema de reúso de Monterrey y sus respectivos caudales de tratamiento

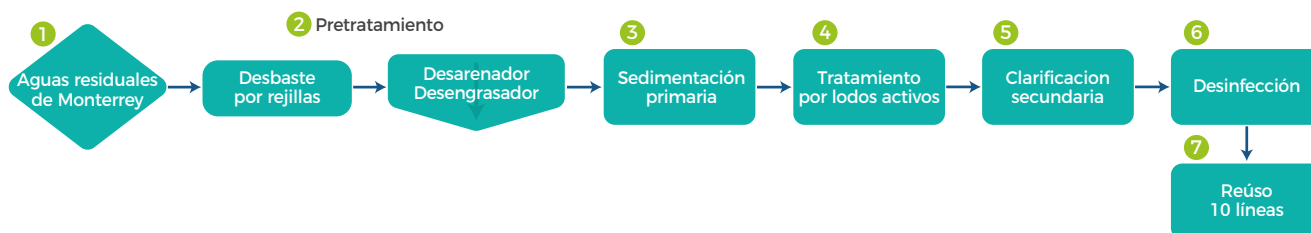
PTAR	Capacidad de diseño (m ³ /día)	Caudal tratado (m ³ /día)
Norte	345 600	219 110
Dulces Nombres	648 000	619 401
García	15 120	6 583
Noreste	162 000	97 182
Santiago	17 280	14 878
Cadereyta 1	21 600	20 183
Cadereyta 2	12 096	9 417
Total	1 221 696	986 754

Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Ayala-Vázquez, F. (2021)

La tecnología de tratamiento en estas plantas es similar, con pequeñas variaciones entre las mismas. Para el tratamiento de las aguas residuales en Monterrey, se eligió la tecnología de lodos activados por tratamiento bacteriano en condiciones aeróbicas. Esta tecnología fue seleccionada ya que, a pesar de demandar una alta cantidad de energía, la relación costo-calidad del efluente es buena, obteniendo la calidad establecida por la norma NOM-003-SEMAR-NAT-1997, necesaria para el reúso restringido (contacto indirecto) del agua tratada. Además, todas las PTAR cuentan con un tratamiento preliminar de rejillas y desarenador/desengrasador. En cuanto a las diferencias, las PTAR Dulces Nombres y Norte, debido al caudal elevado que tratan, cuentan con un tratamiento primario previo al tratamiento por lodos activados. Por otra parte, la planta Cadereyta 1 es la única en contemplar un tratamiento terciario para la remoción de fosfatos, con el objetivo de asegurar la calidad del agua requerida por la refinería Pemex, uno de los principales usuarios del agua de dicha planta. El tratamiento en todas las plantas se completa con una clarificación secundaria, luego del proceso aeróbico y con desinfección por cloro gas o hipoclorito, esto último, dependiendo del caudal de la planta analizada.

CASO 5 MONTERREY

Figura 19: Proceso operativo de las PTAR de Monterrey



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Valverde (2018)

5. TIPOS DE REÚSO

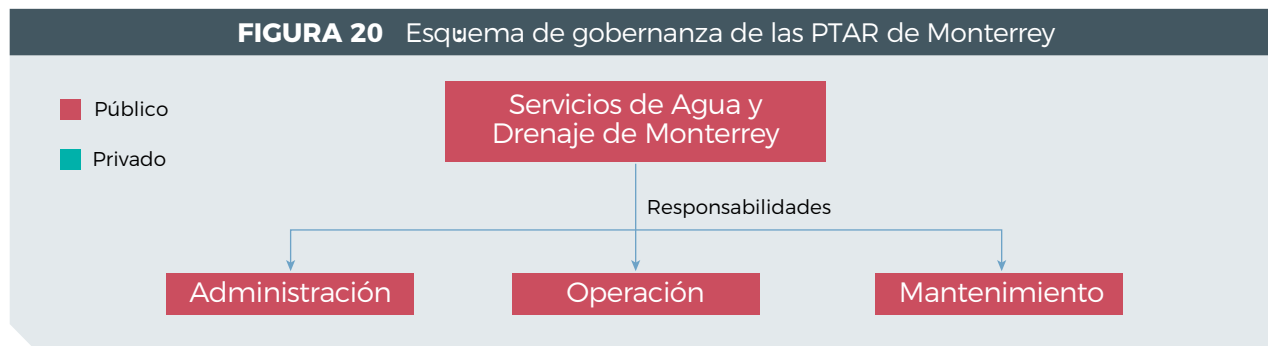
Del total de agua tratada en las siete plantas de tratamiento pertenecientes al sistema de reúso de la ciudad de Monterrey, un promedio de 84 000 m³/día se destinan al reúso urbano e industrial, mientras que 622 080 m³/día se destinan al uso agrícola. En total, SADM mantiene 120 contratos de agua residual tratada con industrias y consumidores urbanos, mientras que posee tres compromisos agrícolas con las localidades de Tamaulipas (distrito de riego 026), ejido San Nicolás y el ejido Francisco Villa. Teniendo en cuenta los caudales de agua tratada y el volumen comprometido, existe aún un volumen disponible de 126 991 m³/día para reúso (SADM, 2021).

Para la distribución de agua tratada, a las industrias y usuarios urbanos, el esquema de reúso del SADM cuenta con una red de distribución de 302,5 km, compuesta por diez líneas troncales y cinco puntos de suministro, desde donde las industrias son responsables de la conexión. Entre las industrias con mayor demanda se destacan, principalmente, la industria de generación de energía eléctrica, la metalmecánica, y la industria química y de manufactura. Las principales actividades en las que se utiliza el agua de reúso, en estas industrias, son: (i) en torres de enfriamiento; (ii) mitigación de polvos; (iii) riego de áreas verdes; y, (iv) generación de energía. Para muchas de estas actividades son necesarios tratamientos terciarios o avanzados, cuya implementación es responsabilidad de cada industria. Entre los usos urbanos, destaca el riego de áreas verdes y campos de golf; mientras que, para el uso agrícola, el riego se destina principalmente a la producción de sorgo, para alimentación de ganado vacuno.

6. GESTIÓN

La gestión de las PTAR de Monterrey es del tipo pública descentralizada, siendo SADM el único responsable de su gestión. SADM se estructura en un consejo de administración, el cual es presidido por el gobernador del estado e integrado por representantes públicos y privados. A su vez, SADM es operado por una estructura directiva, conformada por especialistas de cada una de las áreas de la institución. La Coordinación de Saneamiento es la responsable de llevar a cabo el tratamiento de las aguas residuales y el control de descargas. Con respecto a la relación con los usuarios de agua tratada, SADM no tiene injerencia en los procesos avanzados de tratamiento que utilizan las industrias para mejorar el aprovechamiento del agua de reúso.

CASO 5 MONTERREY



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Ayala-Vázquez, F. (2021)

7. INFORMACIÓN FINANCIERA

Los usuarios finales son públicos y privados, y la estructura tarifaria está determinada de acuerdo con los consumos realizados. A mayor consumo, menor es la tarifa cobrada. Además, los precios del agua residual tratada tienen la finalidad que el consumidor tenga una ventaja económica sobre el agua de otras fuentes, como agua potable o agua de pozo (Arriaga, 2009). En total, existen 108 usuarios, cuya tarifa se rige de acuerdo con el esquema presentado en la tabla 4.

Tabla 4: Estructura tarifaria al mes de marzo, 2021

Volumen (m ³ /día)	Tarifa (USD/m ³)	Número de usuarios
<4 320	0,55	1
4 320-12 960	0,53	2
12 961-25 920	0,51	1
>25 920	0,34	104

Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Yitani et. al., (2019)

Además de estos usuarios, existe una llamada: tarifa de gobierno, que se aplica para el riego de espacios verdes urbanos, así como ocho acuerdos congelados de reúso de aguas, y tres contratos recientes, de los cuales no hay información disponible. Con ello se suman los 120 usuarios totales.

Coste de operación: Un promedio de 0,11 USD/m³ en 2019, considerando los gastos operativos y financieros de todas las plantas bajo estudio.

8. LEGISLACIÓN VIGENTE

México, a través de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente promulgada en 1998, establece las condiciones para el reúso de agua residual tratada, permitiendo la reutilización de las mismas para la industria y la agricultura, bajo distintos niveles de tratamiento.

Para su correcta regulación, el Estado mexicano promulgó la norma NOM-001-SEMARNAT-1996, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, en aguas y bienes nacionales. Un año después, el Estado mexicano promulgó la norma NOM-003-SEMARNAT-1997, la cual indica los distintos

CASO 5 MONTERREY

tipos de reúso posibles, contacto humano directo, indirecto u ocasional, y estableciendo los límites máximos de los parámetros de calidad para cada uno. La norma considera actividades de contacto directo con el usuario: llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí; fuentes de ornato, lavado de vehículos y riego de parques y jardines. Por otro lado, la norma entiende como actividades de contacto indirecto u ocasional a: riego de jardines y camellones en autopistas, camellones en avenidas, fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes de sistemas contra incendio, lagos artificiales no recreativos, barreras hidráulicas de seguridad y panteones.

9. PRINCIPALES RETOS ENCONTRADOS

La operación de las distintas PTAR del sistema de reúso, han encontrado un principal reto:

- Se han detectado descargas de efluentes industriales con una calidad inferior a la estipulada por las normas de calidad de descarga en la red de saneamiento (NOM-003-SEMARNAT-1997), comprometiendo el buen funcionamiento de las PTAR de SADM, y por ende la calidad del agua residual tratada.

10. LECCIONES APRENDIDAS

- Gestión: La fortaleza de SADM deviene de su carácter de Institución Pública Descentralizada (IPD), al tener personalidad jurídica propia y contar con una estructura de gobernanza transversal, lo que le permite, además, contar con una planificación y visión de largo plazo.
- Calidad del efluente a tratar: El éxito de la iniciativa radica en la calidad de las aguas residuales, previo al tratamiento, único punto donde SADM no tiene un control de calidad. Es necesario, entonces, un control sobre las empresas que descargan sus efluentes en la red, para cumplir con la normativa NOM-002-SEMARNAT-1997. Cumplir con este criterio beneficiaría a las industrias al poder utilizar las aguas tratadas.
- Tarifas de agua: El otro pilar de éxito, de la reutilización del agua, radica fuertemente en la política de tarifas del organismo operador. La utilización de agua tratada es atractiva, ya que la tarifa es lo suficientemente económica como para que las empresas consideren establecer sistemas de tratamiento terciario propio, que se adecue a las necesidades de cada usuario final.
- Reúso en contexto de escasez: El agua de reúso, resulta ser una alternativa excelente en un centro urbano como Monterrey, con una fuerte actividad industrial y gran escasez de agua. El agua de reúso, ha permitido abastecer simultáneamente las 24 horas al día, a la población y la industria. Sin embargo, para ello, ha sido necesario crear una cultura de cuidado del agua y desarrollar conocimiento sobre las tecnologías, para tomar decisiones informadas sobre las inversiones de reutilización de agua, con un esquema win-win.
- Proyecto de gran visión: Monterrey está ubicada al noreste de México, región semidesértica, con ubicación estratégica en la relación con la los Estados Unidos de América, donde se asientan las principales instituciones de enseñanza superior y la industria del acero, cemento, vidrio, además de armadoras o fabricantes de partes automotrices. Por ello ha existido desde hace muchos años el interés compartido de los sectores académicos, industriales y de gobierno por identificar mecanismos que permitan abordar los retos de escasez de los recursos hídricos en esa zona.

CASO 6 PUERTO MADRYN

1. INFORMACIÓN GENERAL



País: Argentina.

Lugar: Puerto Madryn.

Contexto de reúso: Urbano, agrícola e industrial.

Usuario final: Usuarios de los espacios verdes de Puerto Madryn, agricultores de olivo y lavanda, e industrias.

Capacidad de tratamiento promedio: Entre 18 000 y 20 000 m³/día.

Organización operativa: Pública, a cargo de la municipalidad de Puerto Madryn y SERVICOO.

Año de inicio del proyecto: 2000.

Año de inicio de operación: 2001.

2. CONTEXTO

Figura 21: Lagunas de tratamiento facultativas PTAR Norte de Puerto Madryn.



Fuente: Mauricio Faleschini (CESIMAR)

Puerto Madryn es una ciudad en la provincia de Chubut, ubicada en la Patagonia argentina. La ciudad ha experimentado un crecimiento de población extraordinario en el último tiempo, pasando de 81 315 habitantes en 2010, a una población estimada de 130 000 habitantes en 2020, debido al desarrollo económico y turístico de la región. Debido al crecimiento poblacional en los últimos años, aproximadamente el 10 % de la población actual, no se encuentra conectada al sistema de alcantarillado, situación que se agrava debido a las fluctuaciones turísticas en la ciudad. Sumado a la situación poblacional, la región de Madryn se encuentra en un clima subdesértico con escasez de agua, y por ello, durante el verano es necesario tomar medidas, como el uso restringido de agua.

Actualmente, la PTAR Norte de la ciudad de Puerto Madryn trata el 90 % del total de las aguas servidas de la ciudad, siendo los principales sectores de reúso: (i) la forestación pública y privada; (ii) el riego de campos de deportes y espacios públicos; (iii) emprendimientos productivos sociales y privados; y, (iv) otros usos urbanos como el riego de carreteras, sistemas de incendios y asfaltado de calles (Faleschini, 2016).

3. MOTIVADORES PARA EL REÚSO DEL AGUA TRATADA

El factor clave, que dio inicio al tratamiento de efluentes en Puerto Madryn, fue evitar la descarga de los mismos al golfo de la costa, con el objetivo de preservar la calidad de las aguas de baño. Sin embargo, la escasez de agua, sufrida en la región, en combinación con el crecimiento demográfico exponencial, fomentó su reutilización con la meta de proveer agua de reúso, para el uso urbano (espacios verdes urbanos, campos deportivos, la limpieza de espacios

CASO 6 PUERTO MADRYN

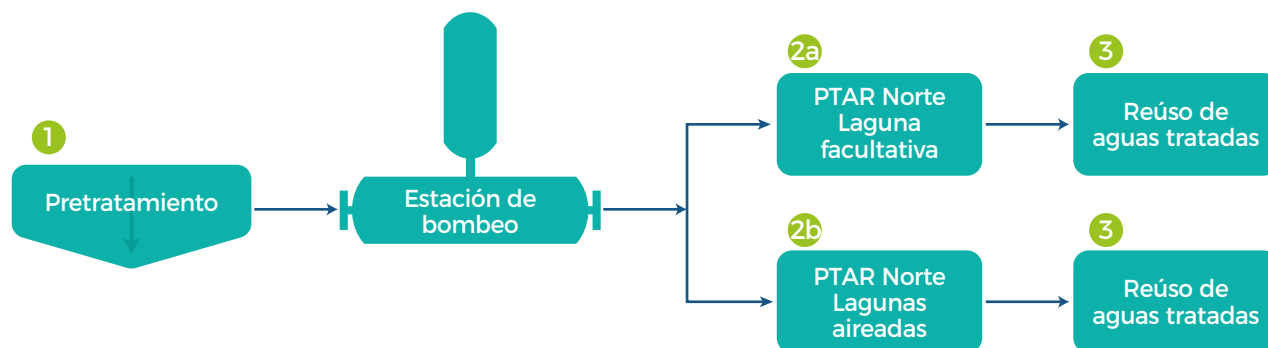
públicos); agrícola (riego para la producción de aceite de olivo, de lavanda y alcaparras); e industrial (Faleschini, 2016).

4. OPERACIÓN

El tipo de tecnología usada, en este caso de estudio, son lagunas de estabilización primarias, facultativas y de concentración. Esta tecnología fue seleccionada considerando el destino final de las aguas residuales tratadas (actividades de contacto restringido) y, debido al bajo costo de mantenimiento, ya que únicamente es requerido el lavado de los canales de recirculación y algunas pequeñas obras de mantenimiento. Además, debido al tamaño de las lagunas facultativas, el tiempo de residencia de las aguas es de 60 días, recibiendo suficiente radiación, para no requerir de cloración final. El pretratamiento consta de un desarenador, un retenedor de materia fina compuesto por un tamiz de 3 mm y un pozo de gruesos. Luego, las aguas son bombeadas a la PTAR Norte, donde se encuentra la laguna facultativa y de concentración, o hacia una de las dos lagunas aireadas ubicadas en la ciudad. En total, se tratan, entre 18 000 m³/día y 20 000 m³/día. Debido al tipo de reúso del agua, no es necesario ningún tipo de tratamiento terciario o adicional para mejorar la calidad del efluente.

En cuanto al transporte y la distribución, las aguas servidas se bombean hasta la planta de pretratamiento para la eliminación de materia gruesa. Luego, las aguas son bombeadas en dos tramos distintos. El primero, hacia la PTAR Norte (hasta 130 m de altura), donde se encuentra la laguna facultativa y de concentración, con un tiempo de residencia de 60 días. El otro tramo, conduce las aguas pretratadas hasta una de las dos lagunas aireadas. Desde la PTAR Norte, el agua se envía al centro de la ciudad, primero por un sistema de bombeo y posteriormente, por gravedad.

Figura 22: Proceso operativo de la PTAR Norte de Puerto Madryn



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Faleschini (2016)

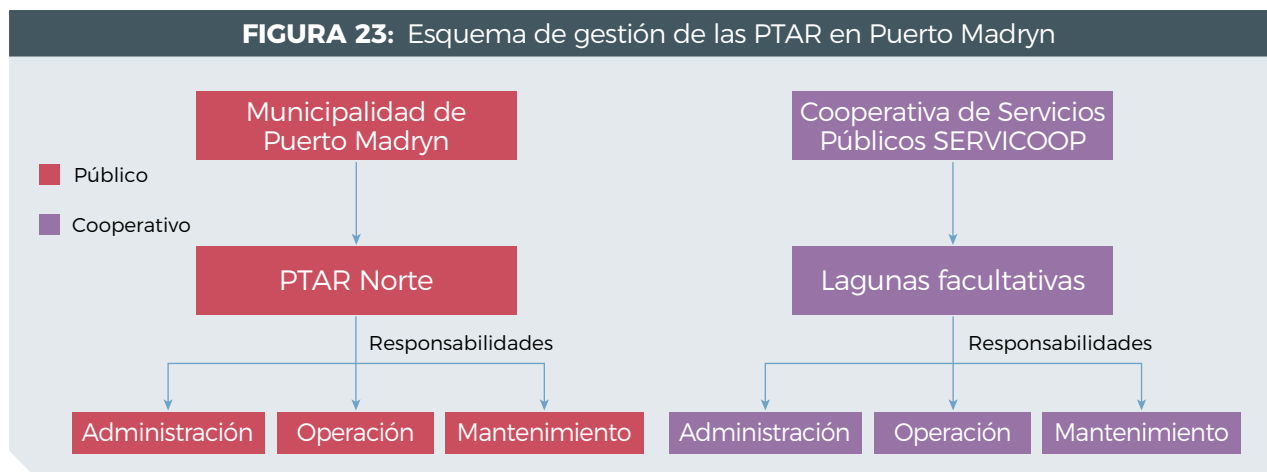
5. TIPOS DE REÚSO

En términos generales, el promedio total de agua residual a ser tratada es de 20 000 m³/día para el periodo primavera-verano, y 19 000 m³/día para el periodo otoño-invierno. Tanto para la PTAR Norte como para la PTAR de lagunas aireadas, el agua tratada se distribuye con distintos objetivos dependiendo la época del año. Mientras que, durante el periodo primavera-verano, el 60 % de las aguas de la PTAR Norte se utiliza en el sector agrícola/forestal, durante el periodo otoño-invierno, un 52 %, es dispuesto en zonas de descarga. Algo similar sucede con el agua proveniente de las lagunas aireadas. Durante el periodo primavera-verano, el 100 % se reutiliza en actividades industriales y forestales; durante el periodo otoño-invierno, un 35 % es dispuesto en los cuerpos de agua.

CASO 6 PUERTO MADRYN

6. GESTIÓN

La gestión de las plantas de tratamiento es 100 % pública. Para seleccionar el tipo de tratamiento y su emplazamiento, se elaboró un proceso participativo y abierto, con la comunidad llamada “La Multisectorial”. En dicho proceso, participaron integrantes del gobierno municipal, la Universidad de la Patagonia, ONG como la Fundación Patagonia Natural, Centros de investigación (CENPAT-CONICET), la Cooperativa de Servicios Públicos (SERVICOOOP), la Cámara de Comercio e Industria y Aluar²⁰, entre otros. Esto permitió consensuar el tipo de emplazamiento de la planta de tratamiento, así como la finalidad de reúso del líquido tratado, el cual debe destinarse íntegramente a la ciudad de Puerto Madryn (Faleschini, 2016). En la actualidad, por un acuerdo verbal entre SERVICOOOP y el municipio, SERVICOOOP²¹ gestiona las lagunas aireadas, mientras que el municipio es responsable de gestionar la PTAR Norte y la distribución de las aguas. El reúso de las aguas es gratuito, ya que el objetivo inicial era evitar el vertido de aguas servidas en el golfo de Madryn. Actualmente, se está comenzando a realizar convenios con consorcios de regantes, en los cuales los vecinos se congregan para acordar la distribución y mantenimiento, dentro de sus tierras; mientras que la municipalidad es responsable de su gestión hasta las mismas.



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Faleschini (2016)

7. INFORMACIÓN FINANCIERA

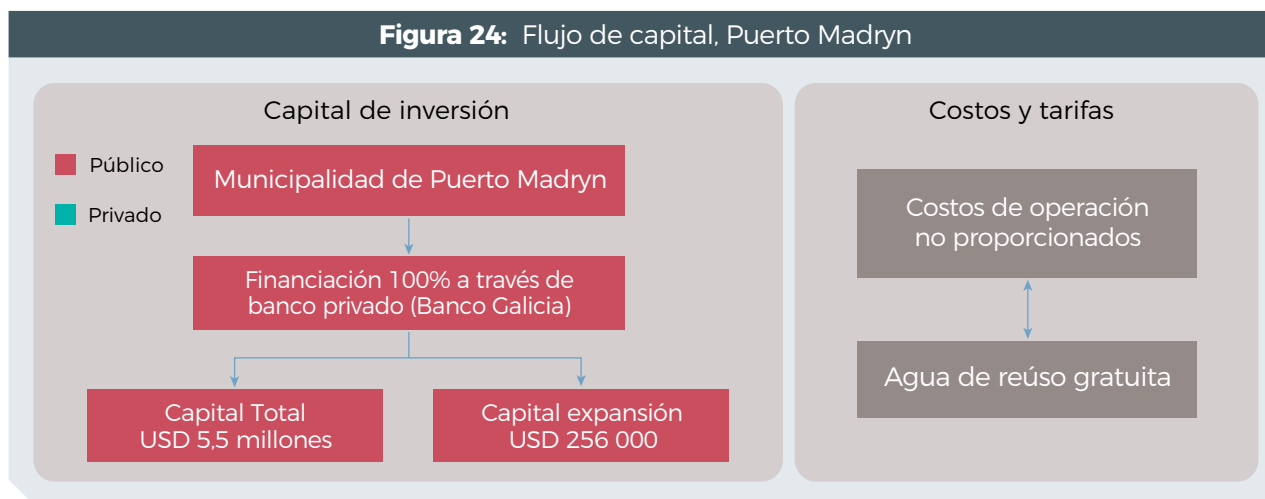
Como se mencionó en la sección anterior, el agua de reúso es gratuita para todo tipo de usuario, con el objetivo de acabar con los vertidos de las aguas servidas al golfo. Por tanto, el costo de mantenimiento de la PTAR Norte es asumido por la municipalidad, gestionado a través de un fondo común, creado con ingresos por impuestos municipales y multas. El costo de mantenimiento y de operación de las lagunas de aireación, en cambio, es asumido por SERVICOOOP, siendo este, mucho mayor al de la PTAR Norte, debido a su mecanización. SERVICOOOP obtiene los fondos del cobro de tarifas por otros servicios públicos, en la ciudad de Puerto Madryn. Al no exigirse una tarifa, en casos de averías, las empresas destinatarias del agua de reúso se hacen, frecuentemente, cargo de la reparación de manera voluntaria (Ursino, 2020).

²⁰ Aluar es la única empresa productora de aluminio primario en Argentina y una de las mayores en Sudamérica.

²¹ SERVICOOOP, una cooperativa de servicios públicos y vivienda de la ciudad de Puerto Madryn, provincia del Chubut, la cual brinda servicios de energía eléctrica, agua potable, alumbrado público, cloacas, servicio de sepelio y biblioteca.

CASO 6 PUERTO MADRYN

En cuanto al capital de inversión, el costo inicial de construcción fue de aproximadamente USD 5 500 000, financiado por el Banco Galicia. Posteriormente, en el año 2009, se planteó la ampliación de la PTAR hasta los 22 000 m³/día, con un costo de USD 256 000, la cual se finalizó en el año 2018.



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Faleschini (2016)

8. LEGISLACIÓN VIGENTE

Argentina no posee legislación, a nivel nacional, que establezca parámetros mínimos, posibles usuarios, ni la promoción de la reutilización de aguas residuales tratadas. Existen, sin embargo, debido al carácter federal de Argentina, provincias con experiencia y legislaciones propias en el ámbito de la utilización de aguas residuales tratadas, principalmente, en actividades del tipo productivo.

En Puerto Madryn, la reutilización de las aguas está regulada por la ordenanza 6301/2006, la cual establece los estándares de referencia de calidad microbiológica del agua residual tratada, según su reúso. Los valores de referencia son tomados de las guías sobre el uso seguro de aguas residuales tratadas en la agricultura y acuicultura, y se encuentran alineados con los requerimientos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), para el uso no restringido del agua de reúso (Madryn, 2006; Faleschini, 2016). Además, existe regulación provincial en lo que respecta reúso de efluentes tratados, dados por el decreto provincial N° 1540/2016 (El Chubunt, 2016).

9. PRINCIPALES RETOS ENCONTRADOS

El caso de Puerto Madryn enfrenta retos operacionales, financieros y regulatorios:

- El principal reto, a nivel local, es la regulación del reúso de las aguas. Al no tener especificada la cantidad de usuarios de las aguas de reúso y el caudal de agua que reciben, se torna imposible llevar un control de los consumos y, posterior, planificación.
- En particular, en el caso de Puerto Madryn, es complicado establecer una tarifa para el reúso de las aguas, que permita cubrir el costo que supone bombear las aguas servidas hasta el lugar de tratamiento. Esto se debe, principalmente, a que es difícil concientizar a la sociedad sobre las virtudes del agua de reúso, sus distintos usos y la necesidad de tarificarla.

CASO 6 PUERTO MADRYN

- La limpieza efectiva de la laguna facultativa y una extracción de sus lodos es otro de los desafíos a afrontar. Existe incertidumbre de cómo enfrentar esta situación, dadas las dimensiones de la laguna y el costo económico que supondría, teniendo que recurrir a fondos nacionales o internacionales, para realizarlo.

10. LECCIONES APRENDIDAS

- Conciencia social: Necesidad de concientizar a la sociedad sobre los beneficios de las aguas de reúso, para incentivar su utilización. En el caso de Puerto Madryn, se empieza a generar un alto interés por parte de la sociedad, a tal nivel, que los vecinos se han organizado en consorcios para solicitar y gestionar el agua de reúso.
- Así como las lagunas facultativas cuentan con beneficios, como el bajo costo de construcción y mantenimiento, también es importante considerar sus puntos débiles, como la variación en la demanda de agua. Para el éxito de la PTAR de Puerto Madryn, fue clave gestionar la demanda del agua de reúso, para prevenir que la laguna se vacíe a niveles críticos para su funcionamiento.

CASO 7 ROSE HALL

1. INFORMACIÓN GENERAL



Localización: Montego Bay

País: Jamaica.

Lugar: Montego Bay, Saint James.

Contexto de reúso: Urbano (riego de campos de golf y jardines de complejos turísticos).

Usuario final: Hoteles.

Volumen promedio tratado: 4 466,78 m³/día.

Organización operativa: Privada, a cargo de la empresa Rose Hall Utilities Limited.

Año de inicio del proyecto: 2005.

Año de inicio de operación: 2007.

2. CONTEXTO

Figura 25: PTAR de Rose Hall Company Limited



Fuente: Cynthia Cameron-Scott (Rose Hall Developments Ltd)

Jamaica es la tercera isla más grande del Caribe, con una población total de 2 727 503, según datos oficiales de 2018 (STATIN, 2018). Según datos del Banco Mundial, al 2017, el 80 % de las aguas consumidas en la isla provenían de acuíferos, y el 87 % de la población jamaicana se encontraba conectada a un sistema de saneamiento básico. A nivel país, el turismo es uno de los sectores económicos más importantes (Aidis, 2015). Dentro de los complejos construidos, en el último tiempo, se destaca el Rose Hall Hilton Hotels, un complejo turístico construido en los años 70, el cual, en el año 2005, tramitó los permisos necesarios para la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales.

En 2006, Rose Hall Utilities Limited²² inició la construcción de la PTAR con el objetivo de reusar el agua para satisfacer sus necesidades de agua, tras experimentar un aumento de usuarios de los complejos hoteleros de la zona y, con ello, evitar la sobreexplotación de los acuíferos. Hasta ese momento, el sistema de tratamiento de las aguas residuales existente se encontraba obsoleto y era manejado de manera individual, lo cual, sumado a una gestión deficiente del sistema, resultó en una degradación de la calidad de las aguas costeras. Así, en diciembre de 2007, se completó la construcción de la PTAR Rose Hall, centralizando el tratamiento y comenzando la experiencia de reúso del agua en la zona, destinado al riego de campos de golf y varios jardines de los complejos de la zona (Silva, 2015).

²² Rose Hall Utilities Limited es una empresa privada encargada de operar la planta de tratamiento de aguas residuales de Montego Bay, Jamaica, para su posterior venta a los complejos hoteleros de la zona.

CASO 7 ROSE HALL

3. MOTIVADORES PARA EL REÚSO DEL AGUA TRATADA

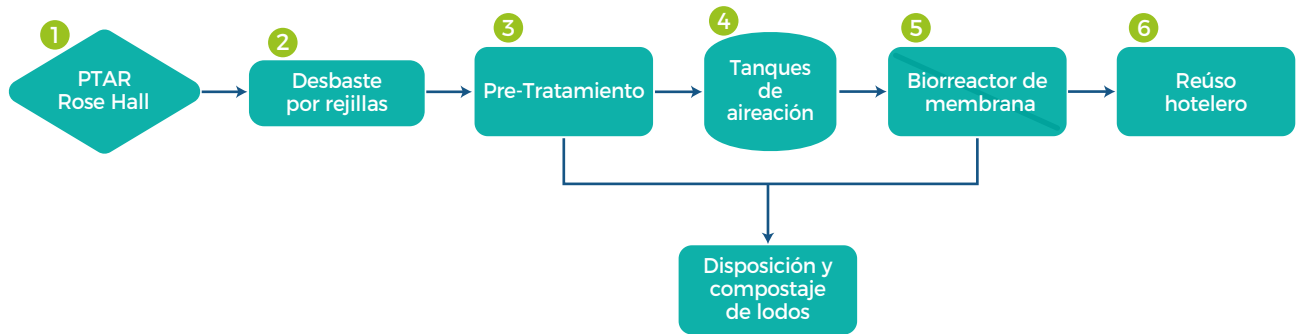
La construcción de la PTAR para el reúso de aguas tratadas, por parte de Rose Hall Utilities Limited, se motivó por los siguientes aspectos:

- Crear una nueva fuente de suministro de agua, que respondiera a las demandas hídricas generadas por el creciente turismo en la región, asimismo, centralizar las plantas individuales de los complejos turísticos, que se encontraban deterioradas, mejorando así la calidad del caudal de salida.
- Ofrecer aguas tratadas de buena calidad para el reúso en jardines y campos de golf, que ocupan más de 800 hectáreas.
- Prevenir la degradación del agua marina por vertidos de aguas tratadas de calidad deficiente, proveniente de las PTAR operadas por cada hotel.
- Reducir la presión sobre acuíferos de la región por la creciente demanda de agua.
- Incrementar la sustentabilidad de las actividades de la empresa hotelera.

4. OPERACIÓN

La tecnología seleccionada para la PTAR fue del tipo biorreactor de membrana (Silva, 2015). La razón para la selección, de este tipo de tecnologías, es la de reemplazar la clarificación, aireación y filtración convencionales, al combinar las características de barrera física de una membrana con un tratamiento biológico, produciendo efluentes de alta calidad en todo momento y utilizando menor espacio. Además, esta tecnología es de fácil instalación, y, por tanto, de menor tiempo de construcción. A su vez, el biorreactor tiene un diseño modular, el cual facilita la incorporación de cambios y ampliaciones. Por último, esta tecnología requiere de poco espacio. Todos estos aspectos fueron importantes al momento de tomar la decisión, ya que la reducción de visibilidad de estos equipos es determinante, a nivel paisajístico, en complejos hoteleros.

Figura 26: Proceso operativo de la PTAR Rose Hall Utilities Limited



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de MBR Central (2020)

CASO 7 ROSE HALL

La PTAR cuenta con dos tanques de aireación para el tratamiento aeróbico, sumado a un biorreactor de membrana con un modo de filtración bombeado (MBR Central, 2020). Durante esta última etapa del proceso, también se eliminan los lodos, los cuales son depositados para su posterior utilización, como composta en los campos de golf.

En promedio, el caudal tratado es de 4 466,78 m³/día, y se prevé su ampliación modular hasta una capacidad máxima de 9 463,53 m³/día, debido a un esperado crecimiento en la demanda. La calidad de las aguas tratadas se rige de acuerdo con lo establecido por The Natural Resource Conservation Authority, organismo estatutario con la responsabilidad principal de la gestión y conservación del medio ambiente²³.

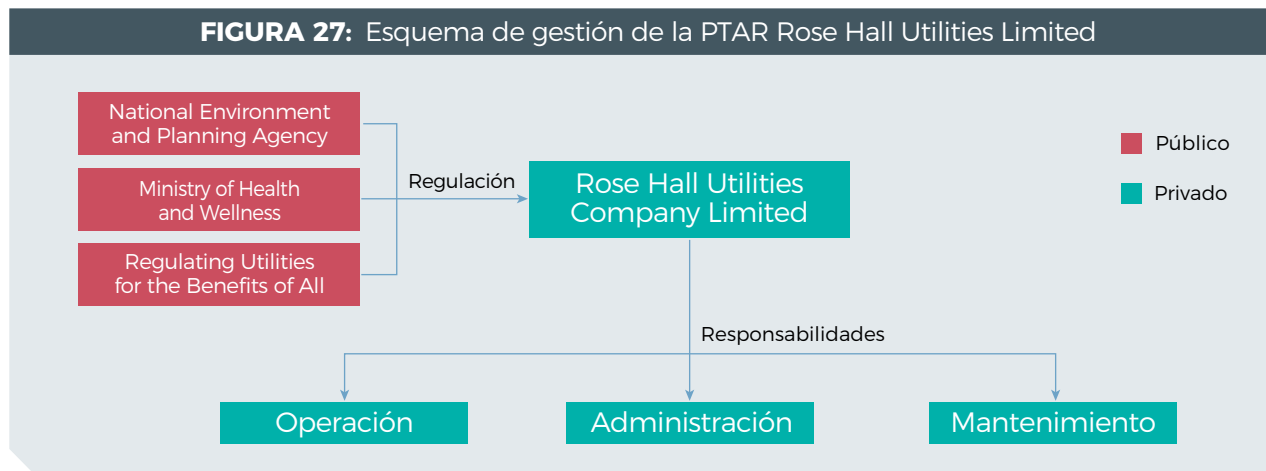
En cuanto al transporte, todas las aguas residuales que llegan a la PTAR de Rose Hall Utilities provienen de los centros comerciales y son conducidos a la planta dentro del complejo hotelero por una tubería de 15 km (Silva, 2015).

5. TIPOS DE REÚSO

Las aguas residuales tratadas por la PTAR Rose Hall Utilities se reutilizan en los jardines y campos de golf de los complejos turísticos de la zona. Además, una parte, de los 1 700 kg/día de lodo que se producen por día, es reutilizada en los campos de golf tras su compostaje (Aidis, 2015).

6. GESTIÓN

La gestión de la planta es totalmente privada, donde la administración, operación y mantenimiento es realizado por Rose Hall Utilities Company Limited, misma empresa que financió la totalidad de la construcción de la PTAR. Por otra parte, la regulación está a cargo de las siguientes entidades públicas: (i) National Environment and Planning Agency (NEPA); (ii) Ministry of Health and Wellness (MOH); y, (iii) Office of Utilities Regulation (OUR). Estas instituciones se encargan de controlar que la PTAR cumpla con los parámetros sanitarios y de calidad ambiental.



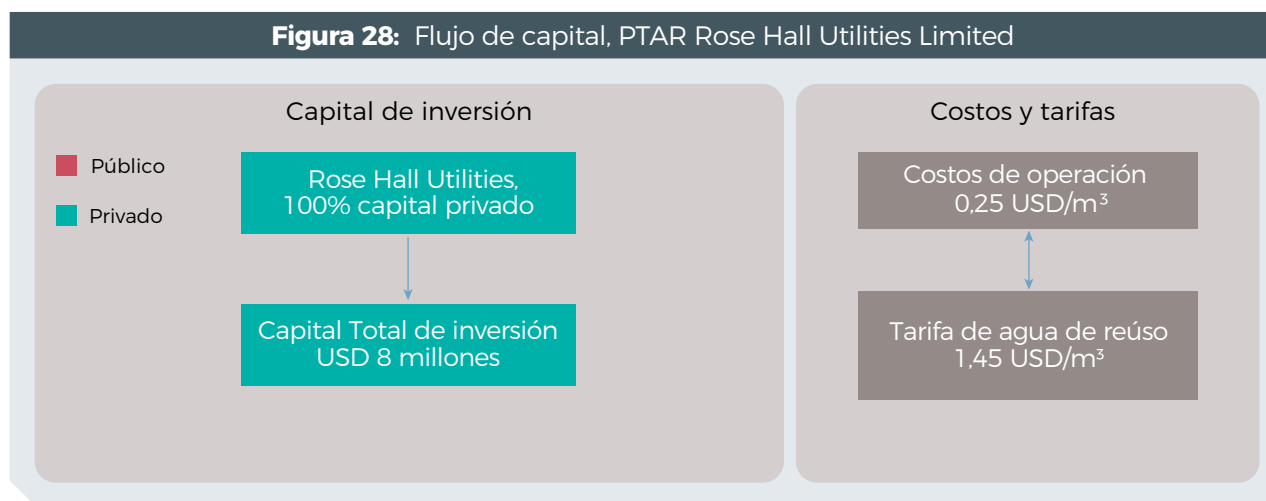
Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Scott (2020)

²³ The Natural Resource Conservation Authority Act, Vol. CXXXVI, N° 29^a del 24 de abril de 2013 (NEPA, 2013).

CASO 7 ROSE HALL

7. INFORMACIÓN FINANCIERA

El capital de inversión para la construcción de la planta fue de USD 8 millones (USD 5 millones iniciales y USD 3 millones previstos para su ampliación), y el costo operativo es de 0,25 USD/m³²⁴. Con respecto a la tarifa a abonar por parte de los usuarios, Rose Hall vende el agua residual tratada a los distintos complejos de la zona a un 20 % más barata que la tarifa plana comercial de agua potable (Jamaica Observer, 2013). De acuerdo con datos de Office of Utilities Regulation, la tarifa plana para comercios ronda los 1,80 USD/m³, por lo que se estima que los usuarios del agua de reúso abonarán alrededor de USD 1,45 por el metro cúbico de agua (OUR, 2021).



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Faleschini (2016)

8. LEGISLACIÓN VIGENTE

Las disposiciones sobre reúso de cuerpos de agua en Jamaica se encuentran en The Natural Resources Conservation (Wastewater and Sludge) Regulations²⁵. Dicha regulación solo permite el reúso para irrigación, y debe ser aprobado por la National Environment & Planning Agency, y cumplir con los estándares de calidad.

9. PRINCIPALES RETOS ENCONTRADOS

La operación de la PTAR de Rose Hall ha enfrentado ciertos retos del tipo operacional, regulatorio y financiero, entre los que se destacan los siguientes desafíos:

- Todos los costes para implementar la PTAR fueron asumidos por Rose Hall Utilities Limited. Para recuperar la inversión en la construcción, Rose Hall Utilities Limited, presentó una solicitud para formalizar la tasa de aguas residuales en Jamaica, con el fin de cubrir el déficit del 22 % de su inversión inicial (OUR, 2011). Sin embargo, ciertos hoteles se incorporaron con retraso al sistema de reúso por escepticismo sobre la calidad de las aguas obtenidas, afectando la recuperación de costos que se tenía prevista.

²⁴ Este costo operativo solo incluye químicos y electricidad utilizada, no incluye costos de personal y otros factores.

²⁵ The Natural Resource Conservation Authority Act, Vol. CXXXVI, N° 29^a del 24 de abril de 2013. (NEPA, 2013).

CASO 7 ROSE HALL

- Se encontraron reticencias, por parte de los reguladores, a la implementación de la PTAR y el reúso de las aguas. Esto dificultó la obtención de los permisos ya que, por ejemplo, la administración pública competente no estaba familiarizada con la tecnología a utilizar. Se tardaron, aproximadamente, dos años y medio en tener la aceptación, mediante la presentación de análisis de laboratorios y la elaboración de informes que mostraban la efectividad del tratamiento.
- La cantidad de lodos (1 700 kg/día) generados, es mayor a la demanda de reúso en los campos de golf. A pesar de que se está estudiando su utilización para la generación de energía, aún no se ha obtenido un resultado satisfactorio al respecto.
- Un biorreactor de membrana tiene un elevado consumo energético. Además, esta tecnología es muy específica, por lo que es complicado encontrar piezas de recambio en Jamaica, teniendo que ser importadas de Canadá y Estados Unidos, elevando su costo.

10. LECCIONES APRENDIDAS

- Regulación: El caso de Rose Hall, demostró que es de vital importancia generar confianza en los reguladores sobre la operación y las tecnologías a utilizar para evitar retrasos. En el caso de la PTAR de Rose Hall, la falta de confianza en las tecnologías de biorreactor de membrana llevó a que las aguas fueran, primero, trasladadas a un lago artificial hasta comprobar su calidad, perdiendo tiempo y recursos. En este sentido, es importante establecer una red de contactos con otros operadores, expertos técnicos o con la propia empresa constructora de la PTAR, a los cuales consultar información técnica y de operación de las PTAR, para consolidar conocimientos y resolver desconfianzas.
- Operación y mantenimiento: Es importante que las personas encargadas de la futura operación y mantenimiento de la PTAR tengan un rol relevante en la construcción e instalación de la misma, ya que serán las responsables de su gestión integral. Esto incluye formación acerca de las nuevas tecnologías, para lograr una innovación tecnológica exitosa. Punto particularmente importante en el caso de Rose Hall donde las tecnologías son innovadoras para la región.
- Tecnología: Cuando se licitó e inició la operación de la PTAR, no se contempló la dificultad que podría suponer conseguir piezas de repuesto. Esto es algo para tener en cuenta en posibles replicaciones dentro de la región, especialmente, en aquellos países donde no es fácil conseguir materiales de importación. Por tanto, es necesario tener los materiales disponibles desde un comienzo o considerar una estrategia efectiva para conseguirlos, en caso de ser necesario.

CASO 8 SACABA

1. INFORMACIÓN GENERAL



País: Bolivia.

Lugar: Sacaba.

Contexto de reúso: Agrícola, urbano y ambiental.

Usuario final: Agricultores de Sacaba, encargados de espacios verdes y de la conservación de las laderas de los ríos.

Organización operativa: Pública, a cargo de EMAPAS.

Capacidad de tratamiento promedio: 16 416 m³/día.

Año de inicio del proyecto: 2008.

Año de inicio de operación: 2012.

2. CONTEXTO

Figura 29: PTAR El Abra



Fuente: EMAPAS

El municipio de Sacaba, ubicado en el área metropolitana de Cochabamba, es un municipio con un fuerte crecimiento poblacional, contando con una población de 172 466 habitantes²⁶, en sus 7 distritos, al año 2012, momento del último censo (Franco Vanegas, 2017)²⁷. Sacaba se encuentra en una zona árida de Bolivia, con escasa vegetación y un gran déficit hídrico. En la actualidad, el 90 % de las aguas consumidas provienen de pozos, muchos de los cuales están en riesgo de sobreexplotación.

Este municipio es, además, la cabecera del río Rocha, también conocido como río Maylanco, el cual presentaba problemas de mala calidad por el vertido de aguas sin tratar en su cauce.

Por tanto, en el año 2008, comenzó un proyecto de recuperación del río, enmarcado en el Plan Maestro de Saneamiento Básico para el municipio de Sacaba, diseñado por la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Sacaba (EMAPAS). Este plan establece la construcción de colectores y emisarios de alcantarillado sanitario, así como la construcción de siete plantas de tratamiento de aguas residuales, con la intención de reutilización de las aguas tratadas en agricultura. Hasta el momento, tres de las PTAR se encuentran en funcionamiento: la planta Curubamba, diseñada para zonas rurales; y la planta El Abra, para la zona urbana del municipio. Por otro lado, el agua tratada de la PTAR Pacata, la tercera en ser construida, actualmente se utiliza solo para el riego de zonas verdes aledañas a la planta.

²² Instituto Nacional de Estadística. (2020). Estadísticas Demográficas. Disponible en: <https://www.ine.gob.bo/index.php/estadisticas-sociales/poblacion/estadisticas-demograficas/> (Acceso: 7 mayo 2020).

²² Según proyecciones, al año 2020, el municipio contaba con más de 200 000 habitantes.

CASO 8 SACABA

3. MOTIVADORES PARA EL REÚSO DEL AGUA TRATADA

De acuerdo al Gobierno Autónomo Departamental de Cochabamba, las plantas de tratamiento destinadas a reúso fueron motivadas por los siguientes factores:

- Reutilizar las aguas tratadas en la agricultura, respetando los parámetros de calidad de agua necesarios para garantizar su seguridad en el uso para la agricultura.
- Recuperar la calidad del río Maylanco que presentaba una alta contaminación por aguas residuales no tratadas.
- Buscar soluciones para el déficit hídrico de la región.
- Incrementar progresivamente la cobertura de tratamiento, hasta alcanzar el 100 % de cobertura de tratamiento de Sacaba.

4. OPERACIÓN

Este caso aborda tres PTAR dentro del municipio de Sacaba. Por tanto, el tipo de tratamiento varía de acuerdo con la PTAR bajo análisis. La selección de las tecnologías, explicadas en la tabla 5, buscó dar respuesta al crecimiento poblacional en zonas urbanas y rurales, de manera simultánea; siguiendo los parámetros de calidad de las aguas tratadas de México, siendo este, un país con experiencia en el sector y considerando que no existe legislación específica en Bolivia. En todas las plantas existe un pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario. En la figura 30 y tabla 5, se detalla información acerca de la tecnología de cada PTAR.



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Zelada, Jaldin y Ramírez, Antelo (2020)

CASO 8 SACABA

Tabla 5: Tratamientos de las PTAR de Sacaba

PTAR	Curubamba	El Abra	Pacata
Tipo de tratamiento	Anaerobio, mediante biorreactor.	Aerobio, mediante filtros percoladores.	Mixto, mediante filtros aireados sumergidos.
Caudal tratado	Caudal promedio de 34,56 m ³ /día.	Entre 3 888 m ³ /día y 4 320 m ³ /día. Capacidad de 11 232 m ³ /día en dos líneas.	Entre 69 m ³ /día a 86,4 m ³ /día. Capacidad de 180 m ³ /día en una sola línea.
Pretratamiento	Desbaste y desengrasador.	Rejas gruesas, rejas finas y desarenadores.	Reja gruesa y desarenador.
Tratamiento primario	Biorreactor.	Sedimentador primario.	Tanque séptico y de eculización.
Tratamiento secundario	Dos biolechos percoladores.	Biolecho percolador y sedimentador secundario.	Filtro aireado sumergido.
Cloración	Mediante pastillas de tricloro.	Gas cloro.	-
Comentario adicional	En 2019, se incorporó una nueva tecnología de prueba, denominada DHS (Down flow Hanging Sponge) que presenta una mayor eficiencia que el biofiltro.	Del caudal tratado, una parte se destina al riego de hortalizas (1 728 m ³ /día), mientras que otra parte es vertida al río. Es la única planta que posee un proceso de disposición de lodos.	En su mayoría, el agua es vertida al río, previo paso por un tanque de almacenamiento. Por ahora, la poca agua reutilizada, se utiliza para el riego de las áreas verdes dentro de la PTAR y de algunos árboles frutales.

5. TIPOS DE REÚSO

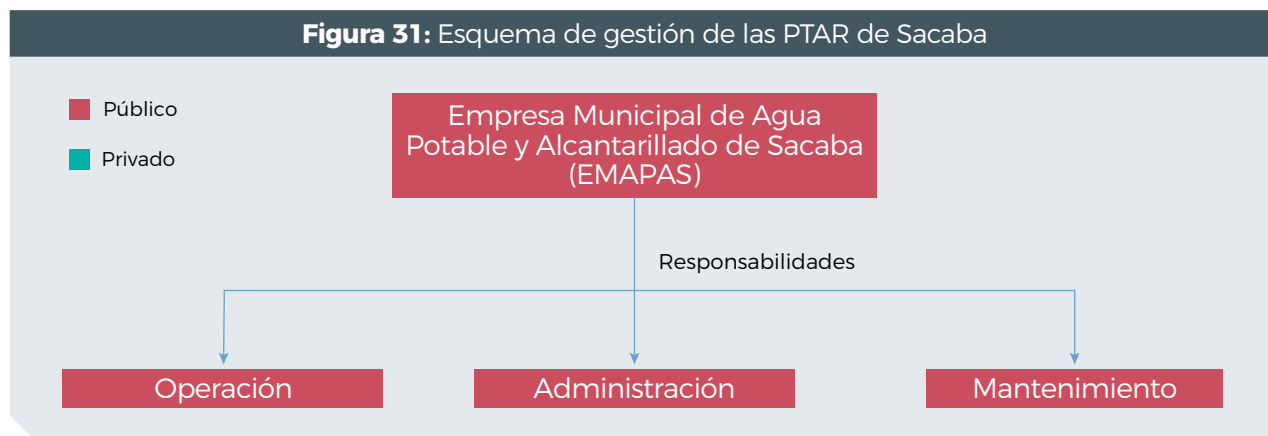
- PTAR Curubamba: El agua tratada se reutiliza para riego de áreas verdes del municipio y para riego interno de la planta.
- PTAR El Abra: El agua tratada es reusada para riego por inundación de hortalizas. También, para riego y recuperación de terrenos considerados zonas de riesgo, donde a través de la disposición de lodos, y la posterior siembra y riego, se han habilitado espacios verdes con una dimensión de 1 ha. Las aguas también se utilizan en la misma PTAR, para el riego de las áreas verdes de la planta.
- PTAR Pacata: El agua tratada, por ahora, solo se usa para riego interno de la planta y árboles frutales linderos.

6. GESTIÓN

La gestión de las PTAR es del tipo público, al 100 %. EMAPAS es la empresa prestadora de los servicios de agua y saneamiento del municipio de Sacaba, encargada de la operación, mantenimiento, cobro de tarifas por tratamiento de aguas residuales y distribución de agua potable; también, es la encargada de la gestión de las aguas residuales en las PTAR. EMAPAS se rige a través del Manual de Procedimientos Técnicos y Administrativos, aprobado desde el 2017, con

CASO 8 SACABA

el objetivo de regularizar a industrias, actividades especiales y hospitalarias, que antes no se encontraban conectadas a la red. Como consecuencia, más de 60 industrias se han incorporado a la red de saneamiento e incluso las empresas de mayor porte han incorporado procesos de pretratamiento propios.



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Zelada, Jaldin y Ramírez, Antelo (2020)

El municipio de Sacaba inició una colaboración triangular entre Bolivia, México y Alemania, con la participación de GIZ, Aguas Municipales de Durango (México) y especialistas de la Conagua, para asesorar a EMAPAS en la ejecución de las obras, la operación y el mantenimiento de la PTAR El Abra.

7. INFORMACIÓN FINANCIERA

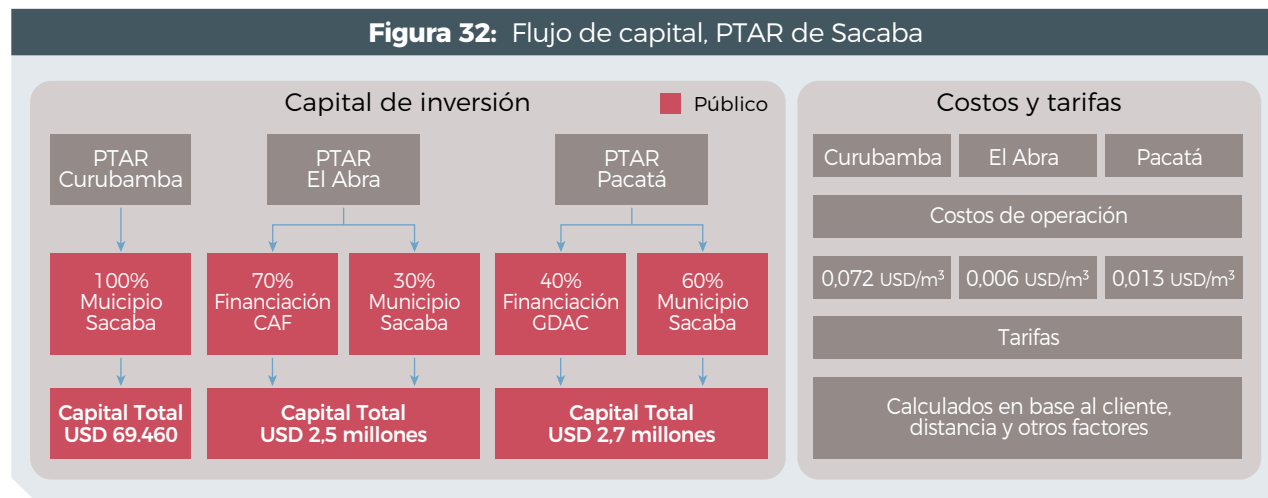
El capital de inversión, para las PTAR, proviene, en todos los casos, de una inversión pública por parte del municipio de Sacaba y con el apoyo financiero de la CAF y el CAD. La figura 32, muestra la suma aportada por cada entidad y el flujo de capital. La principal fuente de ingreso es la tarifa de saneamiento, la cual se rige bajo el principio de quien contamina paga, y el cobro para cada clasificación se realiza mediante una fórmula, que toma en cuenta la calidad de agua residual vertida al alcantarillado y la cantidad de agua potable consumida. En cuanto a la tarifa de agua residual tratada, depende de los costos operativos de las plantas, los cuales varían, dependiendo del tipo de tecnología utilizada. Los costos operativos se muestran en la tabla 6.

Tabla 6: Costos de operación de las PTAR de Sacaba

PTAR	Costo de operación (USD/m ³)
Curubamba	0,072
Abra	0,006
Pacata	0,013

Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de GIZ (2016) y, Zelada Jaldin y Ramírez Antelo (2020)

CASO 8 SACABA



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de GIZ (2016) y Zelada, Jaldin y Ramírez, Antelo (2020)

8. LEGISLACIÓN VIGENTE

En Bolivia no existe, al momento, una ley específica que regule el reúso de agua residual tratada. Sin embargo, existen, a nivel país, leyes del medio ambiente que establecen ciertas reglas para la reutilización. Dentro del Decreto Supremo 24176, promulgado en 1995, se encuentran: (i) el Reglamento de Prevención y Control Ambiental; y, (ii) el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica, entre otros. Dentro de estos reglamentos, se establecen límites máximos admisibles de parámetros en cuerpos receptores. En el caso específico de estas plantas, a nivel local e informal, se ha decidido seguir el modelo mexicano de reúso de aguas, considerando que su diseño y construcción derivó de un contexto de cooperación triangular entre GIZ (Alemania), México y Bolivia.²⁸

9. PRINCIPALES RETOS ENCONTRADOS

La implementación y operación de las PTAR del municipio de Sacaba encontró ciertos retos, de tipo operacional, de regulación y sociales, los cuales se destacan a continuación:

- Ha sido necesario regular el tratamiento previo de las aguas residuales de las industrias para estabilizar los efluentes que llegan a las PTAR. Esto se consiguió con una regulación que obliga a las empresas a tratar el agua previamente a su vertido a los colectores.
- La reglamentación nacional es escasa, lo que limita la implementación de esquemas de reúso. Para afrontar este reto se utilizaron como guía los parámetros de reúso de México.
- Ha sido difícil transmitir a la población la necesidad del tratamiento de las aguas, su reúso y los beneficios que conlleva. Incluso ha sido necesario afrontar cierto rechazo social por posibles efectos asociados como los malos olores y una dificultad inicial para recaudar la tarifa sobre las aguas tratadas (Departamento Autónomo de Cochabamba, s.f.; France Vanegas, 2017).

²⁸ GIZ. (2015). Cooperación Triangular México-Alemania. Disponible en: <https://www.giz.de/de/downloads/giz2015-sp-cooperacion-triangular-mexico-alemania.pdf> (Acceso: 1 junio 2020).

CASO 8 SACABA**10. LECCIONES APRENDIDAS**

- Rechazo social: Para afrontar el rechazo social a las PTAR del municipio, fue necesario mostrar a la población los beneficios que aporta el agua de reúso, y diseñar las PTAR con una vocación de espacio público. Se consiguió conciliar con los interesados, al mostrar la contaminación generada con el vertido de las aguas residuales sin tratamiento al río, así como los riesgos para la salud, cuando se utiliza para el riego de productos agrícolas.
- Rechazo político: Para contrarrestar intereses sociopolíticos que se oponían a la implementación de las PTAR, fue necesario trabajar con todas las partes interesadas. A nivel social, la población confía más en ocasiones en la experiencia de otros países y, por lo tanto, en el caso de Sacaba, se contactó a expertos de México (Conagua y Aguas Municipales de Durango) y la GIZ, para el asesoramiento en la ejecución de la obra, la operación y mantenimiento de la PTAR El Abra.
- Acceso a financiamiento: Tras la elaboración de los proyectos y la mejora del consenso social, se pudo acceder a financiamientos externos de diferentes carteras (BID, CAF, JICA y GIZ, entre otros). Para consolidar esta fuente de financiación, ha sido necesario contar con una contraparte local del municipio, sin embargo, la solidez financiera de la empresa ha sido un factor determinante.
- Tecnología: Para contrarrestar la falta de experiencia en las tecnologías a utilizar en las PTAR, se contó con el apoyo de especialistas, principalmente de México (apoyo de la COTRIMEX), para poder definir las tecnologías adecuadas. Por esta razón, Sacaba es ahora un referente, a nivel nacional, en el uso de las tecnologías aplicadas, y se reciben visitas de diferentes municipios y departamentos, para conocer y replicar esta experiencia exitosa.

CASO 9 TENORIO

1. INFORMACIÓN GENERAL



País: México.
Lugar: Villa de Reyes, San Luis Potosí.
Contexto de reúso: Agrícola e industrial.
Usuario final: Agricultores de San Luis Potosí, la Central Termoeléctrica Villa de Reyes y otras zonas industriales.
Capacidad de tratamiento promedio: 90 720 m ³ /día.
Organización operativa: Asociación público-privada, Comisión Estatal de Agua y Aguas del Reúso de Tenorio. Contrato BOT por 20 años.
Año de inicio del proyecto: 2000.
Año de inicio de operación: 2006.

2. CONTEXTO

La región metropolitana de San Luis Potosí cuenta con más de 2,7 millones de habitantes, siendo una zona de gran desarrollo industrial y económico. Sin embargo, la región cuenta con gran escasez de agua, recibiendo solo 400 mm de lluvia al año, dependiendo fuertemente de fuentes subterráneas del acuífero Villa de Reyes, del valle de San Luis Potosí, para su abastecimiento (World Bank, 2018c). Con el objetivo de proteger el acuífero, y promover el uso de las aguas residuales tratadas, el gobierno regional lanzó el Plan Integral de Saneamiento y Reúso de Agua, en 1998. Desde entonces, se han construido siete PTAR, tratando así alrededor del 85 % de las aguas residuales y reusándose el 100 % de las mismas (Canales, A. s.f.; World Bank, 2018c).



Figura 33: PTAR Tenorio San Luis Potosí

Fuente: Comisión Estatal del Agua de San Luis Potosí

Entre las PTAR construidas, la planta Tenorio es un referente a nivel internacional por su eficiencia y sustentabilidad ambiental, social y económica (Real, 2018). La iniciativa público-privada que comenzó su operación en 2006, es la planta más grande en la región metropolitana, teniendo la capacidad de tratar el 45 % de las aguas residuales urbanas generadas en la ciudad. Los usos finales del agua residual tratada son de tipo industrial y agrícola, teniendo la planta un proceso diferente para cada uso, siendo así, la primera PTAR en México en producir diferentes calidades de agua de reúso (World Bank, 2018c).

CASO 9 TENORIO

3. MOTIVADORES PARA EL REÚSO DEL AGUA TRATADA

La construcción de la PTAR Tenorio, y el reúso del agua tratada, fue motivada por los siguientes factores:

- Incrementar la cobertura de tratamiento de aguas residuales en la región metropolitana de San Luis Potosí en un 40 %.
- Reutilizar las aguas tratadas para el riego de zonas agrícolas que, anteriormente, utilizaban aguas negras, contrarrestando problemas de salud de la población.
- Evitar el uso del agua proveniente de acuífero para la refrigeración de la central termoeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en Villa de Reyes, reemplazando este recurso con aguas residuales tratadas, reduciendo la sobreexplotación del acuífero.
- Reducir la contaminación del medio ambiente generado por las infiltraciones de aguas residuales domésticas, descargas industriales y lixiviados de tiraderos clandestinos, cumpliendo con la legislación vigente, en materia de descarga de aguas residuales urbanas.

4. OPERACIÓN

El tipo de tecnología usada en esta planta cuenta con tratamiento primario avanzado, lodos activados y tratamiento terciario. La razón para utilizar esta tecnología es tener distintas alternativas para cumplir con los parámetros necesarios por las distintas opciones de reúso y la calidad que cada una exige. Así, para el uso agrícola se estimó necesario hacer un tratamiento primario, en combinación con lagunas artificiales, mientras que para cumplir con la calidad requerida para la central termoeléctrica de Villa de Reyes son necesarios tratamientos secundarios y terciarios. La división de las aguas en dos tipos de tratamiento, según el usuario final, es el factor más innovador de esta PTAR, ya que es la primera, con estas características, que se ha construido en México. La planta tiene una capacidad media de 90 720 m³/día (Canales, A., s.f.; Comisión Estatal de Agua, s.f.; World Bank, 2018c). La figura 34 muestra el proceso de tratamiento de la planta Tenorio.

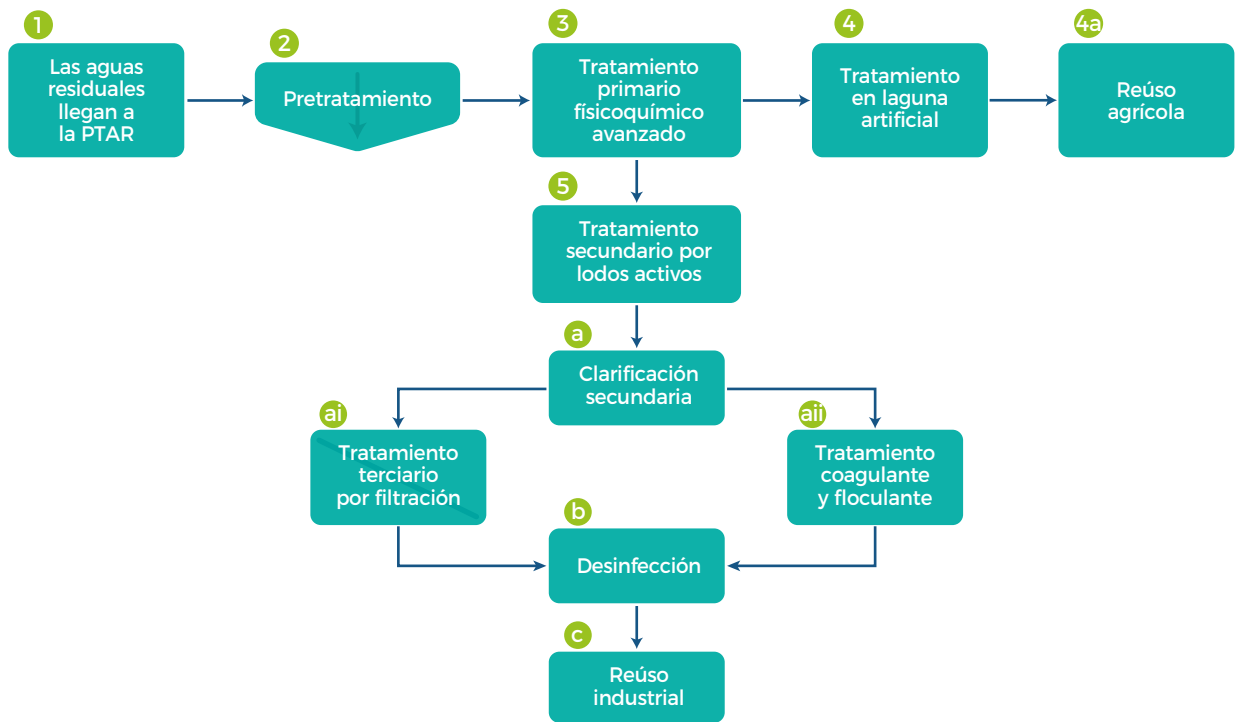
Al ingreso a la planta, las aguas residuales son sometidas a un pretratamiento por desbaste. Luego, son enviadas a un tratamiento avanzado de tipo físico-químico, donde las partículas suspendidas son eliminadas a través de desarenadores/desengrasadores aireados, seguidos por una clarificación lamelar, facilitada con la incorporación de coagulantes y floculantes²⁹. Luego de esta etapa, el tratamiento se bifurca en dos. La primera vía es destinada al tratamiento para reúso en zonas agrícolas, donde 51 840 m³/día son derivados a una laguna artificial de 2 millones de m². En la segunda vía, 38 880 m³/día se dirigen al tratamiento secundario biológico por lodos activados, el cual culmina con clarificación secundaria de las aguas tratadas. Una vez finalizado el proceso de clarificación, el proceso se separa en dos líneas de tratamiento. Por un lado, el tratamiento terciario por filtración con arenas, y por otro, el tratamiento con coagulantes, floculantes y descarbonatación. Posteriormente, el agua se vuelve a unir para su desinfección por gas cloro para luego ser destinadas a la refrigeración de la central termoeléctrica.

En cuanto a la recolección de agua residual, el proyecto cuenta con 5 colectores alcanzando 18,9 km de longitud. En cuanto a la distribución de agua residual tratada, la línea morada cuenta con 39 km de longitud.

²⁹ Proceso físico-químico "DENSADEG", con coagulación, floculación y recirculación de lodos en decantador lamelar.

CASO 9 TENORIO

Figura 34: Proceso operativo de la PTAR Tenorio



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Duran de Anda (2020)

5. TIPOS DE REÚSO

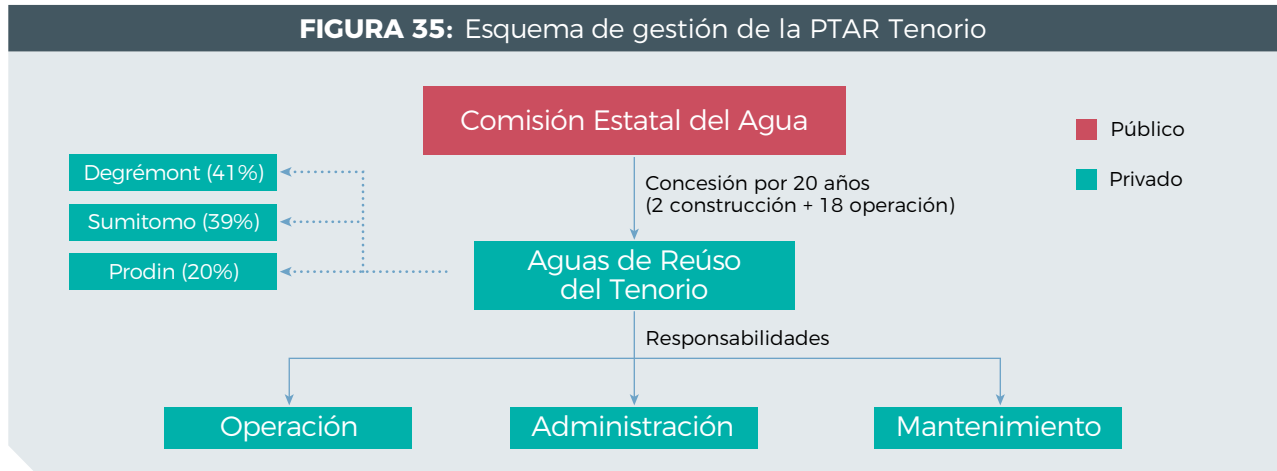
- Del tratamiento primario, se derivan 51 840 m³/día para el riego de 500 ha en cultivos de alfalfa y para riego de pasto para el forraje de ganado (Equihua & Rojas, 2013).
- Del tratamiento secundario, se derivan 38 880 m³/día para su uso en la Central Termoeléctrica Villa de Reyes y zonas industriales (Equihua & Rojas, 2013).

6. GESTIÓN

La gestión de la planta es del tipo asociación público-privada. Para asegurar la sustentabilidad del proyecto, la Comisión Estatal del Agua (CEA) firmó dos contratos y un convenio. El primer contrato fue de construcción, operación y mantenimiento de la PTAR, con la empresa Aguas del Reúso del Tenorio S.A. (ARTE), compuesta por los accionistas Degremont, Sumitomo y Prodin, poseedores de un 41 %, 39 % y 20 %, de las acciones, respectivamente. El contrato iniciado en 2004 es por 20 años y prevé dos años para la construcción, y 18 de operación y mantenimiento. El segundo acuerdo fue para la compra de las aguas tratadas con la CFE, permitiendo tomar el riesgo de implementar un proyecto de estas dimensiones. Este acuerdo, entre la CEA y la CFE, estableció que el precio de las aguas tratadas para el reúso fuera un 67 % más barato para las industrias que el de otras fuentes, a modo de suponer un beneficio mutuo para ambos actores. Por último, existe un convenio con los usuarios para riego agrícola, en el cual se entrega agua residual tratada a cambio de agua residual sanitaria. Por su parte, la CEA es el responsable de supervisar y autorizar el tratamiento de agua, asimismo, controlar la calidad de entrega, a las industrias y al sector agrícola (World Bank, 2018c).

CASO 9 TENORIO

FIGURA 35: Esquema de gestión de la PTAR Tenorio



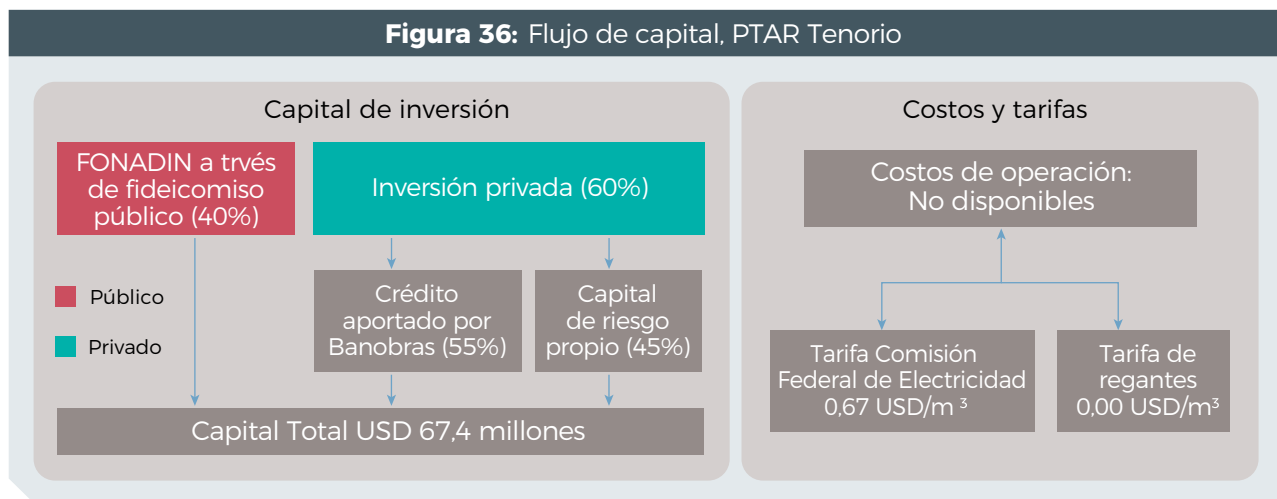
Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Duran de Anda (2020)

7. INFORMACIÓN FINANCIERA

La inversión inicial fue de USD 67,4 millones. Del total, un 40 % de la inversión fue pública, provista por FONADIN, a través de un fideicomiso público; mientras que el 60 % restante fue financiado a través de fondos privados. Del 60 % restante, 55 % fue provisto por el Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos (BANOBRAS), a través de una cuenta de construcción, y 45 % por parte de los inversionistas privados (World Bank, 2018c).

En cuanto a la estructura tarifaria, existen tarifas diferenciadas para los regantes, la central térmica y la CFE. El acuerdo, entre la Comisión Estatal del Agua y la CFE, estableció que el precio de las aguas tratadas, para el reúso, sería en un 67 % más baratas para las industrias que el de otras fuentes, siendo de 0,76 USD/m³. En cambio, para los agricultores existe el acuerdo que el uso de agua residual tratada es gratis, a cambio de la entrega de las aguas residuales por parte de los agricultores, para su tratamiento en la PTAR. Los costos de operación y mantenimiento, para este sistema, no se encuentran disponibles.

Figura 36: Flujo de capital, PTAR Tenorio



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Duran de Anda (2020)

CASO 9 TENORIO

8. LEGISLACIÓN VIGENTE

México, a través de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, promulgada en 1998, establece las condiciones para el reúso de agua residual tratada, permitiendo la reutilización de las mismas para la industria y la agricultura, bajo distintos niveles de tratamiento.

Para su correcta regulación, el Estado mexicano promulgó la norma NOM-001-SEMARNAT-1996, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales, en aguas y bienes nacionales. Un año después, el Estado mexicano promulgó la norma NOM-003-SEMARNAT-1997, que diferencia los distintos tipos de reúso posibles, entre contacto humano directo, indirecto u ocasional, estableciendo distintos límites de los parámetros de calidad para cada uno. La norma considera actividades de contacto directo con el usuario: llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí; fuentes de ornato, lavado de vehículos y riego de parques y jardines. Por otro lado, la norma entiende como actividades de contacto indirecto u ocasional: riego de jardines y camellones en autopistas, camellones en avenidas, fuentes de ornato, campos de golf, abastecimiento de hidrantes de sistemas contra incendio, lagos artificiales no recreativos, barreras hidráulicas de seguridad y panteones.

Además, en este caso en particular, existe una calidad acordada con la CFE para su uso en las torres de refrigeración, basada en el anexo del Contrato de Suministro de Aguas Residuales Tratadas, llamado Manual de Especificaciones Técnicas.

9. PRINCIPALES RETOS ENCONTRADOS

La construcción y operación de la PTAR Tenorio ha enfrentado desafíos del tipo social, operacional y financiero, entre los que se destacan:

- Previo a su construcción, existieron conflictos sociales debido a la oposición de los usuarios agrícolas. Esto se debía a que los productores temían que el tratamiento redujera el contenido de nutrientes en las aguas, tema que fue resuelto a través de la creación de espacios de participación ciudadana impulsados por la CEA.
- Durante la fase de operación, surgieron problemas con el cumplimiento de la calidad de agua requerida por la CFE, según el contrato establecido. Esto se debió a que la calidad del influente se veía afectada por vertidos industriales descargados ilegalmente al sistema de saneamiento de San Luis Potosí.
- La CFE de Villa de Reyes estableció una tarifa del uso de agua residual tratada para cubrir los costos de operación y mantenimiento de la planta. Sin embargo, los costos de la inversión en la construcción de la PTAR no pudieron ser cubiertos.
- En línea con el último reto, el tipo de tratamiento requerido para la producción agrícola y la falta de eficiencia en el riego dificulta que se puedan destinar las aguas de reúso a otros usuarios, que potencialmente podrían generar mayores retornos.

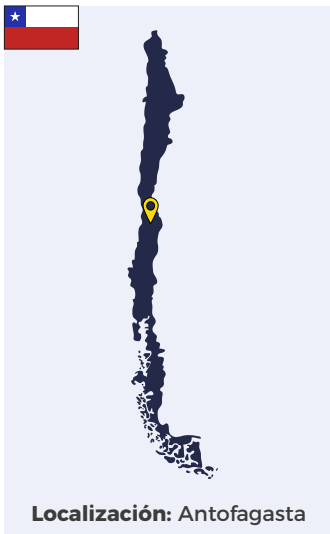
CASO 9 TENORIO

10. LECCIONES APRENDIDAS

- Entorno adecuado: Contar con un marco normativo adecuado, sumado a una economía de escala y los altos precios del agua en la región, han sido factores claves en el éxito de este proyecto. El contrato firmado por el gobierno con ARTE ha permitido que la CEA no tuviera que realizar un gasto tan elevado al inicio del proyecto. Por otro lado, a nivel nacional, existen en México, un conjunto de políticas respecto de la regulación y el precio de reúso de las aguas tratadas que reflejan la escasez y favorecen esta actividad.
- Divulgación pública de los beneficios de las aguas residuales tratadas: Es importante comunicar los beneficios, tanto a las empresas como a la sociedad civil. En el caso de los agricultores, la CEA tuvo que explicar que los nutrientes del agua no se iban a extraer del agua residual tratada. En el caso de las empresas, aun no se ha logrado que las aguas de reúso sean usadas por otras industrias.
- Dar seguridad a los clientes: La adaptación del tipo de tratamiento de acuerdo con el destino del agua, es un elemento innovador que facilita el compromiso del cliente. Además, el contrato entre la CEA y la CFE se renueva bianualmente, otorgando un marco de seguridad para el cliente, en el que se asegure el cumplimiento de la calidad establecida.
- Conocimiento experto: ARTE consta de asesoramiento experto de cada uno de sus integrantes (SUEZ, Sumitomo y Prodin). SUEZ, especialista en el tema del tratamiento de las aguas residuales, aporta la experiencia y soporte en la operación y mantenimiento de la planta, así como el cumplimiento de los parámetros establecidos en el Contrato de Prestación de Servicios. Por su parte, Prodin es un socio constructor especializado, y Sumitomo, es el socio con experiencia financiera, siendo ARTE una unión transitoria de empresas con experiencia multidisciplinaria.

CASO 10 SANTIAGO DE CHILE

1. INFORMACIÓN GENERAL



País: Chile.
Lugar: Santiago de Chile.
Contexto de reúso: Industrial y agrícola.
Usuario final: Agricultores y central hidroeléctrica.
Organización operativa: Privada, a cargo de Aguas Andinas y otorgado por contrato BOT a Edam Ltda (Suez Environment).
Capacidad de tratamiento promedio: 1 520 640 m ³ /día, en todo el sistema (PTAR Farfana y Mapocho).
Año de inicio del proyecto: 1995.
Año de inicio de operación: 2001.

2. CONTEXTO



Figura 37: PTAR La Farfana

Fuente: Yves Letsy (Aguas Andinas)

La región metropolitana del Gran Santiago de Chile cuenta con, aproximadamente, 4,7 millones de habitantes según el último censo de 2017³⁰. Hasta 1990, el tratamiento de las aguas servidas era prácticamente inexistente en el país, y la región del Gran Santiago vertía la totalidad de sus aguas servidas al río Mapocho. Siendo el río Mapocho la principal fuente de riego para los agricultores de la región, la situación potenció el desarrollo de enfermedades entéricas de origen hídrico. En este marco, Chile emprendió, a nivel nacional, un plan para tratar las aguas servidas de todas las zonas urbanizadas del país, en un plazo de 10 años. El plan se concretó, en el caso de la región metropolitana, con la construcción de dos plantas de tratamiento

para el Gran Santiago (El Trenal y La Farfana), y de 12 plantas de tratamiento para las localidades urbanas ubicadas en la periferia. Esto permitió generar condiciones sanitarias satisfactorias, de manera directa, a través de los canales de riego con agua tratada, o indirecta, por la toma de agua en el río Mapocho.

³⁰ Gobierno Regional Metropolitano de Santiago. Datos geográficos. Disponible en: <https://www.gobiernosantiago.cl/datos-geograficos/>

CASO 10 SANTIAGO DE CHILE

3. MOTIVADORES PARA EL REÚSO DEL AGUA TRATADA

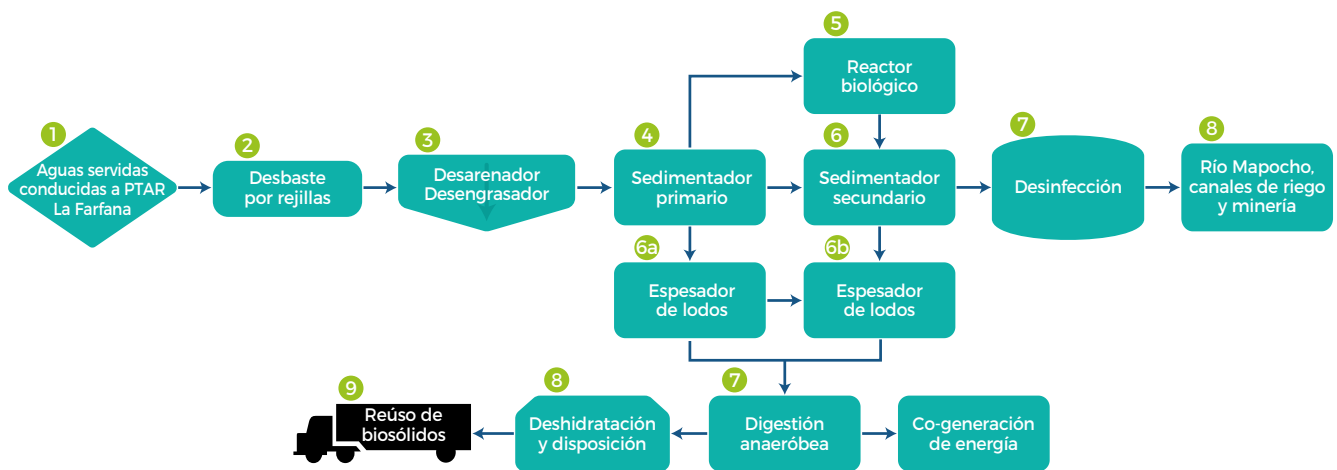
La construcción de las PTAR El Trebal y La Farfana, y el reúso de su agua tratada, se motivaron en los siguientes factores:

- Hacer frente a la demanda de agua en un contexto de extrema sequía prolongada y escasez del recurso hídrico.
- Recuperar el estado ecológico del río Mapocho, el cual presentaba una elevada contaminación al verterse aguas servidas sin tratar.
- Estas plantas de tratamiento se encuentran, además, incorporadas dentro de una nueva fase de desarrollo bajo los principios de la economía circular, promovido por el gobierno de Chile, mediante la cual, se busca transformar las plantas de tratamiento en biofactorías, que permita la recuperación de energía y el aprovechamiento de lodos, ricos en nutrientes para su reutilización en el sector agrícola.

4. OPERACIÓN

El tratamiento de las aguas, en las dos plantas, consta de un pretratamiento, decantación primaria, tratamiento por lodos activos y desinfección por cloro, variando en pequeños detalles, como el sistema de pretratamiento o el tipo de cloración. En cuanto al tratamiento de lodos, los mismos se llevan a un proceso de espesamiento, digestión anaeróbica y deshidratación por centrifuga (Chapple, 2008). Este tipo de tecnología se eligió con el objetivo de: (i) tener un tratamiento eficiente desde el punto de vista energético, utilizando decantación primaria y lodos activados de alta carga y, a su vez, tratamiento anaeróbico de lodos para obtener biogás; y, (ii) disponer de un lodo estabilizado para evitar problemas de malos olores y complejidades logísticas. Ambas plantas cuentan con una capacidad de tratamiento de 760 320 m³/día.

Figura 38: Proceso operativo de las PTAR La Farfana y Mapocho-Trebal



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Chapple (2008)

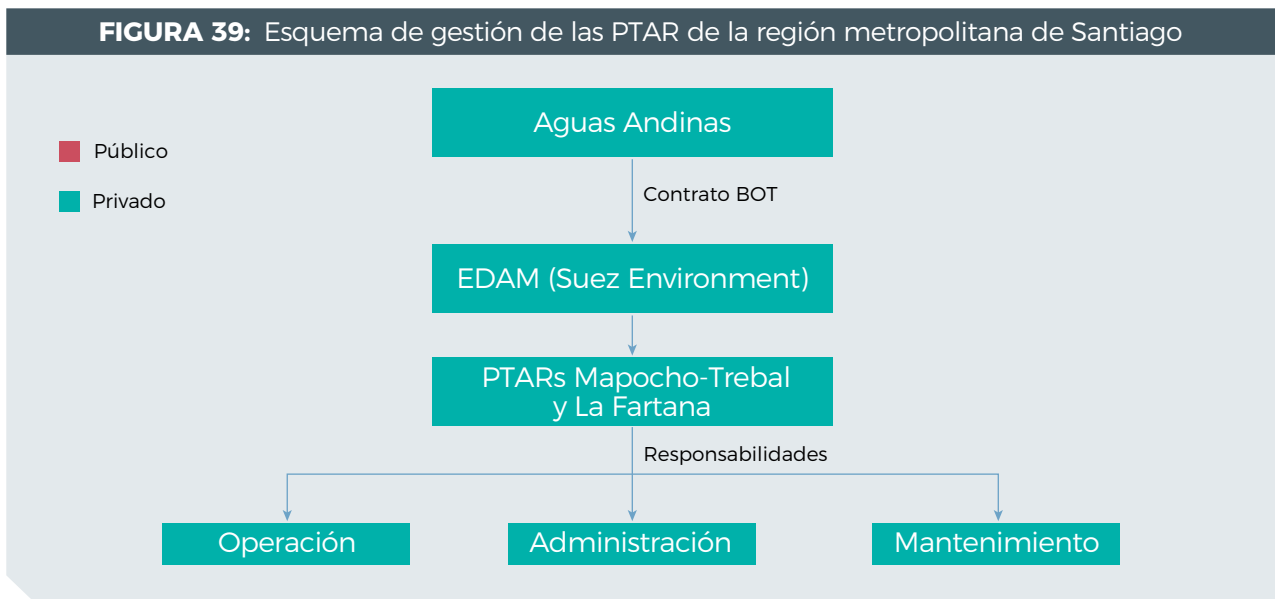
CASO 10 SANTIAGO DE CHILE

5. TIPOS DE REÚSO

- La mayor parte del agua tratada se reutiliza en agricultura. Una parte pequeña del agua se reutiliza directamente por alimentación de canales de riego (canal Rinconada con entrega de 129 600 m³/día de agua tratada de la planta La Farfana), mientras que la mayor parte se utiliza indirectamente a través de las captaciones del río Mapocho al cual se vierten las aguas tratadas de las plantas.
- Por otra parte, el canal Las Mercedes, con una toma de 907 200 m³/día sobre el río Mapocho, abastece una central hidroeléctrica y otras zonas agrícolas más alejadas.
- Por último, 10 368 m³/día del agua tratada se entrega como agua de reúso a una empresa minera mediante camiones, con el objetivo de llegar a 17 280 m³/día. En el futuro, se prevé construir una línea de conducción para abastecer la demanda minera del agua de reúso.

6. GESTIÓN

La gestión de las plantas es del tipo privado, al 100 %. En el año 2000, Aguas Andinas adquirió los activos y la gestión de los servicios del ciclo integral del agua en Santiago de Chile. La empresa Aguas Andinas ha estado a cargo del plan de saneamiento de la región metropolitana, entre 2000 y 2012, periodo en el que se alcanzó el 100 % de las aguas residuales tratadas para la región. En este marco, Aguas Andinas desarrolló los estudios de impacto ambiental, correspondientes a los proyectos, así como las licitaciones relativas a las ingenierías de detalle, construcción, operación y mantenimiento de las plantas. La primera extensión (190 080 m³/día) de la planta el Trebal se hizo a través de una licitación internacional de construcción, operación y mantenimiento de las instalaciones, que fue adjudicada a Suez (SUEZ en América Latina, n.d.).

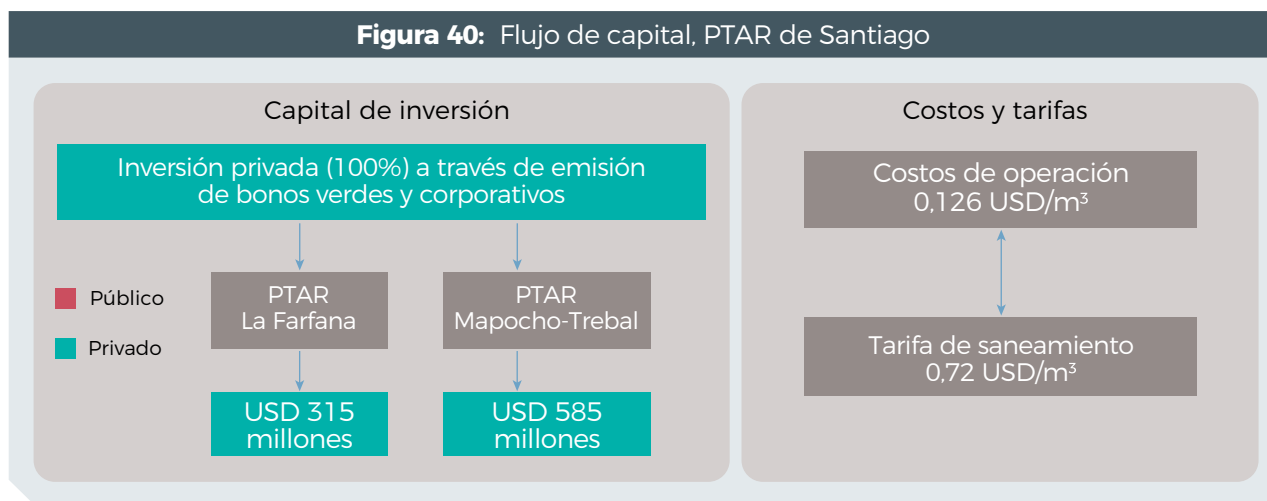


Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de SUEZ (s.f.)

CASO 10 SANTIAGO DE CHILE

7. INFORMACIÓN FINANCIERA

El costo de inversión realizada para ambas plantas, incluyendo los interceptores y emisarios de alimentación y de descargas, fue de USD 900 millones, de los cuales USD 315 millones se destinaron a la PTAR La Farfana y USD 585 millones para Mapocho-Trebal. Para financiar el proyecto, Aguas Andinas utilizó bonos verdes y corporativos. El costo de tratamiento del agua es de 0,126 USD/m³ y su fuente de ingreso principal es la tarifa de saneamiento aplicada al precio de metro cubico de agua potable, el cual es del orden de 0,72 USD/m³ (Lesty, 2020).



Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de Lesty (2020)

8. LEGISLACIÓN VIGENTE

En el año 2018, Chile promulgó la ley N° 21 075 referente a la recolección, reutilización y disposición de las aguas grises. Los sistemas de reutilización previstos por la ley se enfocan en el tratamiento y reúso exclusivo de las aguas grises, las cuales no podrán ser utilizados para actividades de consumo humano directo (agua potable) o indirecto (riego de frutas y hortalizas). El uso de las aguas grises tratadas, por tanto, está restringido a los usos: urbanos, recreativos, ornamentales, industriales y ambientales. En el caso de las aguas negras, la ley no prevé su tratamiento y posterior reutilización. En el caso de Chile, las aguas negras tratadas fueron excluidas de la ley y, por tanto, su reutilización no se encuentra reglamentada, hasta el momento.

Sin embargo, dicha ley aún enfrenta desafíos en cuanto a su aplicación. A pesar de su promulgación en 2018, existen retrasos en la aprobación de la reglamentación que detalle los requerimientos técnicos del agua gris tratada. Es por esto, que los sistemas de tratamiento y reutilización de aguas grises tratadas aún no son aplicados de manera sistemática en Chile. Además de los aspectos legales, la implementación de esta ley implicaría la separación de aguas grises y negras, un sistema que no está implementado actualmente en Chile y que implicaría una inversión sustancial.

CASO 10 SANTIAGO DE CHILE

9. PRINCIPALES RETOS ENCONTRADOS

- La operación de las plantas encuentra desafíos a nivel social. Los malos olores producidos por las PTAR El Trebal y La Farfana fueron un problema al momento de su construcción debido a la falta de tecnología para un adecuado tratamiento de los lodos. Aunque esto fue subsanado con las nuevas etapas, la urbanización del sector aledaño a la planta genera nuevos reclamos por emisiones de olores de los procesos de tratamiento, para los cuales, es necesario implementar nuevas medidas de mitigación.
- A nivel nacional, la falta de una normativa específica para el reúso del agua todavía es un problema en Chile, aunque se está avanzando en un proyecto de ley basado en normas existentes en otros países.

10. LECCIONES APRENDIDAS

- Marco regulatorio: Tener un marco regulatorio permite tener una seguridad sobre el desarrollo de actividades relacionadas con los productos generados en las biofactorías, biosólidos o el agua residual tratada. Para esto, es crucial mantener un consenso interinstitucional con las administraciones implicadas.
- Modelo tarifario: En Chile, existe un modelo tarifario regulado que ha permitido desarrollar un proyecto ambicioso, permitiendo realizar inversiones a corto plazo con un equilibrio económico, tanto para el cliente como para el operador. La tarifa se fija cada 5 años y se indexa por variación de un trinomio de tres factores, utilizando una empresa modelo para la metodología del cálculo y simulando una situación de competencia hacia esa empresa modelo. Este marco asegura niveles de rentabilidad adecuados y compatibiliza con eficiencia, autofinanciamiento y equidad. Sumado a esto, la economía de escala permite que la tarifa de Santiago de Chile sea la más barata de todas las capitales regionales del país.
- Economía circular: Para disminuir la producción de residuos, es importante reducir, al mínimo posible, la producción de biosólidos, utilizando la digestión anaeróbica, permitiendo, además, la generación de biogás.

6 HALLAZGOS Y LECCIONES APRENDIDAS

Los diez casos analizados fueron seleccionados con el objetivo de mostrar casos ubicados en contextos territoriales distintos y con distintas magnitudes de caudal tratado, tipo de reúso y modelo de gestión, entre otros aspectos. A pesar de la heterogeneidad de los casos, es posible reconocer puntos en común, respecto de los principales motivadores, desafíos encontrados, y lecciones aprendidas; aspectos que los llevaron a ser ejemplos de éxito en materia de reúso de aguas tratadas en la región. Por tanto, la presente sección tiene por objetivo mostrar y sintetizar los principales hallazgos y lecciones aprendidas identificados en los distintos casos, para que sirvan de referencia a los distintos actores involucrados en el proceso de reutilización de aguas tratadas en la región.

6.1. PRINCIPALES MOTIVADORES

En la tabla 7 se muestran las principales causas que motivaron el reúso de agua tratada en los diez casos de estudio seleccionados.

La principal motivación, en todos los casos, es hacer frente a la escasez de agua en la región donde se sitúan. Varias de las ciudades presentadas, a través de los casos de estudio, se encuentran en zonas áridas, demostrando la distribución desigual de los recursos hídricos en América Latina y el Caribe. Este problema se verá acentuado, no solo por el cambio climático reduciendo el agua disponible en zonas ya vulnerables, sino también debido al crecimiento poblacional que experimentan las zonas urbanas de la región. Por tanto, esta primera causa se podría considerar como aquella que engloba a todos los motivadores que tienen como objetivo el aumento de la demanda.

Dentro de los casos que buscan aumentar la demanda de recursos hídricos en zonas de escasez, el caso más reiterado (7 de los 10 casos) fue la necesidad de encontrar nuevas fuentes de agua para usos industriales. Sobre todo, en aquellas ciudades donde la minería es la principal actividad industrial, el reúso de aguas tratadas figura como una oportunidad muy atractiva para las empresas del sector, frente a otras oportunidades como el agua desalinizada, por cuestiones económicas, o el agua de pozo, un recurso menos renovable y más susceptible a cambios antropogénicos.

En segundo lugar, la reducción de la contaminación de cuerpos de agua, la mejora de calidad de vida de las poblaciones aledañas y el incremento de agua segura para el riego agrícola fueron los principales motivadores en 6 de los 10 casos analizados. Esto resalta la necesidad de muchas poblaciones de acceder a fuentes de agua segura que brinden mayor salud a la comunidad y ambientes más saludables que mejoren la calidad de vida. A su vez, el aumento de la demanda de agua para uso agrícola presenta lecciones aprendidas interesantes, respecto a escala, tipo de tratamiento y participación de la sociedad civil, aspectos que se tocarán más adelante.

Tabla 7: Principales motivadores de reúso

	Antofagasta	Aquapolo Ambiental	Atotonilco	Cerro Verde	Monterrey	Puerto Madryn	Rose Hall	Sacaba	Tenorio	Santiago de Chile
Hacer frente a la demanda de agua en un contexto de escasez/aridez	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Uso industrial para evitar el consumo de otras fuentes de agua	✓	✓		✓	✓	✓	✓		✓	
Reducir la contaminación de cuerpos de agua receptores			✓				✓	✓	✓	✓
Cumplir con la normativa vigente y mejorar la calidad de vida de comunidades aledañas	✓		✓	✓		✓		✓	✓	
Incrementar la oferta de agua para riego en zonas agrícolas de forma segura	✓		✓		✓	✓		✓	✓	
Responder a la demanda por crecimiento demográfico					✓	✓	✓	✓		
Reducir conflictos sociales generados por la competencia por el agua				✓						

Fuente: Elaboración propia

6.2. TECNOLOGÍAS UTILIZADAS

El avance tecnológico y la experiencia adquirida en el uso de distintas tecnologías permite, en la actualidad, elegir a partir de distintas tecnologías probadas, aquella que responda mejor a la calidad de agua necesaria para su reúso, en vez de buscar cumplir con parámetros homogéneos. Esto permite optimizar los procesos de tratamiento y los costos de los procesos. Referente a esto, a pesar de que algunos de los proyectos han requerido ajustes durante su operación, los diez casos analizados han resultado exitosos en la correcta selección de sus tecnologías para el tipo de reúso del agua residual tratada. La tabla 8 muestra un resumen de las tecnologías utilizadas por las PTAR analizadas y a continuación se realiza un breve análisis.

Tabla 8: Tecnologías usadas

TECNOLOGÍA	TIPO DE REÚSO	CASOS DE ESTUDIO
TRATAMIENTO PRIMARIO O SECUNDARIO		
Lodos activados	Industrial, urbano, agrícola, ambiental.	Antafogasta, Monterrey, Atotonilco, Tenorio, Santiago de Chile, Sacaba
Lechos percoladores	Industrial	Cerro Verde, Sacaba
Lagunas facultativas	Urbano, agrícola e industrial	Puerto Madryn
TRATAMIENTO TERCIARIO		
Tratamiento terciario por filtración con arenas	Industrial	Tenorio
Biorreactor de membrana (MBR)	Industrial, urbano	Aquapolo Ambiental, Rose Hall
Membranas de ósmosis inversa	Industrial	Aquapolo Ambiental
Tratamiento terciario por biofiltros en humedales	Industrial	Sacaba

Fuente: Elaboración propia

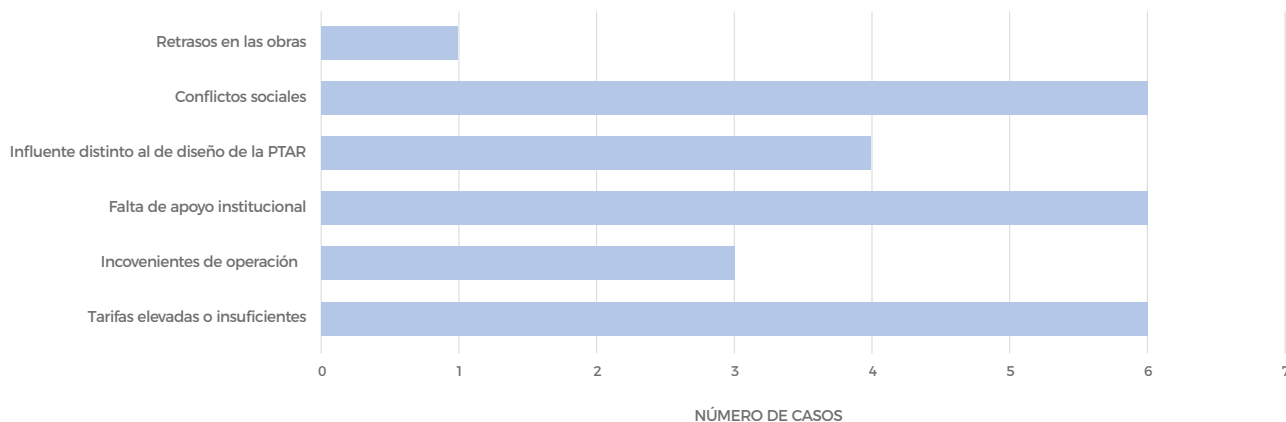
De los 10 casos seleccionados, 6 de ellos, utilizan tratamiento secundario por medio de lodos activados. Este tipo de tratamiento es el proceso de tratamiento biológico de aguas residuales más utilizado en el mundo, considerando la rapidez del proceso, el espacio necesario para su construcción con respecto al volumen a tratar, la capacidad de tratar influentes de distintas calidades y los costos de operación razonables. La calidad del agua obtenida, luego de este tratamiento, otorga flexibilidad a los esquemas de reúso que lo utilizan, tanto para el sector agrícola como el industrial. Por un lado, en los casos de reúso en el sector agrícola, este tipo de efluentes aún mantiene los nutrientes necesarios para fertilizar los cultivos, mientras que, en el caso del reúso industrial, las industrias pueden realizar, sobre estas aguas, el tratamiento terciario que requieran para sus procesos.

En el caso del esquema de Puerto Madryn, la combinación de una gran extensión de terreno, caudal relativamente bajo, la alta variabilidad estacional, y el tipo de reúso del efluente, hizo que se optara por las lagunas facultativas como tecnología de tratamiento, buscando bajos costos operativos. En el caso de Rose Hall, la elección de la tecnología MBR se debió a una cuestión de espacios reducidos, junto con la posibilidad de hacer ampliaciones modulares, en caso de crecimiento de la demanda; mientras que, para el caso de Aquapolo Ambiental, la selección de esta tecnología y de ósmosis inversa se justificó por la exigente calidad de efluente requerida por contrato, además de contar con un gran capital de financiación y un contrato fijo, que le permitió volcarse sobre tecnologías más eficientes aunque con mayor costo de operación.

6.3. RETOS ENCONTRADOS

Los 10 casos de estudio han encontrado, durante las distintas etapas de los proyectos, diferentes tipos de retos de tipo tecnológicos, sociales, financieros y de carácter institucional. La figura 41, muestra un resumen de los principales retos y la cantidad de casos en que éstos fueron detectados:

Figura 41: Principales retos encontrados



Fuente: Elaboración propia

Los retos identificados, con más frecuencia, en los casos de estudio (6 de 10) son: (i) la falta de apoyo institucional; (ii) tarifas elevadas o insuficientes; y, (iii) los conflictos sociales.

La falta de apoyo institucional es, quizás, el más complejo de todos los retos encontrados, ya que abarca varios aspectos. En el sentido más directo, se ha notado una falta significativa de reglamentación y normativa, a nivel nacional, en seis de los casos. Esto ha representado un gran problema para muchos de los proyectos, ya que dificulta el establecimiento de metas, así como la operación de las plantas y el control adecuado de los parámetros de descarga de las aguas residuales. Se reconoció, además, en tres de los casos, una falta de apoyo hacia el uso de esquemas de participación privada, esquemas utilizados en varios de los casos bajo análisis. Este último punto se ha visto evidenciado por la falta de incentivos financieros y políticos, e inexistencia de un marco regulatorio claro para este tipo de asociaciones.

Respecto del sistema tarifario, el principal reto, en alguno de los casos de estudio, se presenta en la complicación, por parte de las autoridades responsables, para cobrar la tarifa correspondiente. En tres casos (Atotonilco, Puerto Madryn y Santiago de Chile) se opta por el uso gratuito del agua de reúso, por parte de los usuarios, siendo el caso de Tenorio, una situación mixta. Esta decisión para fomentar el reúso podría, sin embargo, significar un riesgo de sostenibilidad. Cabe destacar, en este punto, que un proyecto de reúso no necesariamente tiene que financiar todos los costos de saneamiento. Sería positivo que la tarifa de agua de reúso cubra sus propios gastos incrementales, produciendo un ahorro en el conjunto del sistema. Su análisis financiero, con frecuencia, no puede ser dissociado del sistema de agua y saneamiento del que forma parte. En este aspecto, se observaron casos donde la tarifa de saneamiento juega un rol clave en la sostenibilidad financiera.

En aquellos casos donde existe una tarifa de reúso, la variabilidad de tarifas es muy amplia³¹, ya que dependen de los costos de tratamiento. Algunos esquemas como los de Antofagasta, Rose Hall y Aquapolo Ambiental, han logra-

³¹ El valor inferior observado es, en el caso de Monterrey, de USD 0,34-0,55/m³. Como valores superiores, se observan casos como Rose Hall y Antofagasta, con USD 1.45/m³ y USD 1.2-1.8/m³, respectivamente. La tarifa de Antofagasta depende del caudal y la distancia de impulsión hasta el cliente.

do obtener tarifas suficientes para no poner en riesgo la sostenibilidad del proyecto. En el caso de Antofagasta, se ha demostrado que el agua de reúso puede ser una opción atractiva, aún con tarifas relativamente altas, si existen restricciones para acceder a alternativas más baratas (por ejemplo, agua de pozo y agua potable) y si es competitiva, frente a otras alternativas (por ejemplo, agua desalada). En los casos de Monterrey y Sacaba, los ingresos por la tarifa de reúso son ingresos importantes y complementarios a los de saneamiento.

Dentro de los retos más frecuentes, también se encuentran los conflictos sociales. Los principales conflictos en los distintos casos han sido debido a: (i) quejas por los malos olores generados por las plantas, no generados por el reúso, pero que generan oposición en la población a este tipo de proyectos; (ii) reclamos por una potencial disminución en la cantidad de agua disponible para riego de zonas agrícolas; y, (iii) temor a una disminución en la cantidad de nutrientes presentes en el agua utilizada para riego.

Por último, existieron también otros retos que se observaron de manera menos frecuente en los casos bajo análisis, pero son importantes destacar. Un claro ejemplo fue, en algunos casos, la inadecuada calidad y cantidad del influente a tratar, lo que altera los procesos de tratamiento y no permite generar agua con la calidad requerida por los clientes. Por otro lado, existieron también, inconvenientes al momento de la operación y el mantenimiento de algunas de las plantas, como es el caso de Rose Hall y Aquapolo Ambiental, donde la inclusión de tecnologías tan innovadoras llevó a un proceso extenso de aprendizaje de éstas, generando impactos económicos. Por último, un aspecto común en obras civiles de gran envergadura, existieron también, algunos retrasos en la construcción de las plantas.

6.4. LECCIONES APRENDIDAS

En base a los casos analizados, se hace evidente que el apoyo institucional hacia los esquemas de reúso de aguas tratadas es un aspecto clave para el éxito de estos. Principalmente, los proyectos demuestran que el reúso de aguas tratadas debe ser una cuestión de Estado, donde éste facilite los proyectos de reúso desde distintas aristas. En particular, se destaca frecuentemente, el rol del sector público, mediante el diseño de esquemas de asociaciones público-privadas (APP), uno de los métodos de gestión más utilizados en los casos de estudio. Casos como el de Atotonilco y Antofagasta han demostrado que un apoyo institucional a través de: (i) mejores tasas de préstamo; (ii) mayores plazos de concesión; (iii) mayores porcentajes de financiación pública; (iv) un marco regulatorio sólido y claro, estimulan la participación de los actores privados otorgando grandes beneficios a este tipo de proyectos de reúso, desde beneficios económicos hasta conocimientos técnicos.

Casos como Sacaba, Tenorio y Antofagasta, también han evidenciado, que la participación del sector privado no solo le quita presiones económicas al sector público, sino también que también permite la transferencia de la experiencia del sector privado en este tipo de proyectos. La comunicación acerca de los beneficios de este tipo de obras y de las APP, no solo es necesario para la sociedad civil sino también para los actores públicos, mejorando la percepción institucional sobre las APP y el reúso de aguas, aumentando la cooperación de los mismos en todas las aristas del proyecto. Uno de los casos más ejemplares es el de Cerro Verde, donde la planificación de la PTAR motivó que el gobierno de Perú promoviera nuevas regulaciones para fomentar la participación privada, inexistentes hasta ese momento. En este sentido, los casos de estudio, bajo este tipo de gestión, han demostrado que: (i) un marco regulatorio claro y transparente para los actores privados; (ii) apoyo político y financiero; y, (iii) cooperación en la difusión de los beneficios, han creado los mayores casos de éxito, causando un mayor respaldo institucional y generando sinergia entre las partes.

En línea con la importancia del apoyo institucional, los casos de Chile y México han demostrado que la existencia de reglamentación respecto al reúso de aguas tratadas y a las descargas de efluentes, es un aspecto clave para diseñar y definir los proyectos de reúso y evitar incertidumbres en las etapas de operación y planificación. Sin embargo, específicamente, los casos como de Atotonilco y Monterrey, muestran que la existencia de una reglamentación no es suficiente por sí sola, si no existen mecanismos efectivos de regulación y control, que permitan asegurar la calidad del influente a tratar. Ambos proyectos, tuvieron que lidiar con descargas ilegales que modificaban la calidad del influente a las plantas, afectando el tratamiento del mismo y poniendo en riesgo la calidad del agua tratada y su posterior reúso.

Con respecto a la calidad del agua tratada y el tipo de tecnología a utilizar, los diez casos analizados en el presente estudio, han demostrado ser exitosos, ya que a pesar de que algunos afrontaron inconvenientes iniciales debido a utilizar tecnologías innovadoras (Aquapolo Ambiental) o por problemas de apoyo institucional (Rose Hall), todos los casos dejan como lección la importancia de la adecuación del tipo de tratamiento, no solo la calidad del influente, sino también a las condiciones locales y al tipo de reúso final. En este sentido, Atotonilco es quizás el caso de éxito más significativo, ya que siendo la tercera PTAR más grande del mundo, posee dos tipos de proceso dependiendo del tipo de reúso, adaptándose a las necesidades locales.

Asegurar la demanda del agua residual tratada desde el diseño de los proyectos ha sido clave, no solo para la selección de la tecnología sino también para identificar la fuente de financiamiento. Asimismo, el asegurar la demanda de agua a través de contratos de largo plazo y específicamente, la utilización de contratos take or pay, han dado grandes resultados, así como el diseño de tarifas que permitan la recuperación de costos.

Otra lección aprendida, obtenida de los casos analizados, es la importancia en la comunicación, concientización y transparencia de los proyectos en materia de salud, productividad y medio ambiente, evitando conflictos con la sociedad civil. Casos como Cerro Verde, Sacaba y Atotonilco, demostraron que un rol proactivo de la comunidad, a través de procesos participativos, propuestos por las APP, han sido claves para lograr consensos y reducir conflictos sociales. En este sentido, estos proyectos han demostrado que es necesaria la participación de los actores privados para explicar el proyecto y sus beneficios, asimismo del Estado, para actuar como articulador entre las partes y como regulador de los trabajos comprometidos. También, en el caso de Puerto Madryn, la comunicación ha demostrado ser un aspecto relevante. En este caso, no con el objetivo de detener conflictos sociales sino para persuadir a la población local de la relevancia de este tipo de actividades y, en consecuencia, de la necesidad de tarificar este servicio.

7 CONCLUSIONES

La incorporación del reúso en un sistema de saneamiento no es un proceso simple, ya que depende de una gran cantidad de variables particulares a cada contexto. Sin embargo, los casos presentados en la nota técnica no solo demuestran el potencial de uso de agua residual tratada en la región sino las posibilidades de éxito y aplicabilidad en distintos contextos, destinos de reúso, formas de gestión y financiación entre otros aspectos. A pesar de la complejidad y heterogeneidad de los casos analizados, el estudio integral de los mismos permitió obtener puntos en común respecto de retos y lecciones aprendidas a tomar en cuenta en futuros proyectos de reúso dentro de la región.

Los hallazgos y lecciones aprendidas, de la presente nota técnica, no buscan presentar esquemas a replicar, sino que intentan servir de referencia y motivación para los actores involucrados en el sector de saneamiento, para evaluar y considerar la reutilización de efluentes tratados dentro de sus análisis de alternativas para incidir en su viabilidad.

Es importante remarcar que, a pesar de haber obtenido varios puntos en común, las lecciones aprendidas de los casos de éxito no pueden ser aisladas una de otras, ni del contexto en el que se emplazan. Existe una interrelación estrecha entre los distintos retos y la forma en que fueron afrontados, así como de las condiciones que favorecieron el buen funcionamiento de los esquemas de reúso. Dando el contexto actual mundial y de la región, es menester cambiar de paradigma y entender al agua residual de reúso, ya no como una solución aislada sino como una opción competitiva frente a otras fuentes de agua, e incluso, como un potencial negocio en aquellos lugares donde sea viable.

8 REFERENCIAS

- Agua (2019). Programa de Sustentabilidad Hídrica de la Cuenca del Valle de México – Agua.org.mx. Disponible en: <https://agua.org.mx/biblioteca/programa-de-sustentabilidad-hidrica-de-la-cuenca-del-valle-de-mexico/> (Accedido: 28 abril 2020).
- Aguas Andinas (2010). Proyecto de Biogás: Nueva Energía para Santiago. Agosto de 2010. Disponible en: <https://docplayer.es/12155513-Proyecto-de-biogas-nueva-energia-para-santiago-agosto-de-2010.html>
- Aidis (2016). Uso seguro del agua para el reúso. Aidis. Disponible en: https://climatesmartwater.org/wp-content/uploads/sites/2/2018/09/AIDIS-Uso_seguro_del_agua_26_sep.pdf
- Aquapolo (2019). Aquapolo SEP. Disponible en: <https://www.aquapolo.com.br/>
- Arriaga, B.N. (2009). Escenarios para el reúso de agua residual tratada en el Área Metropolitana de Monterrey al 2021. Monterrey, 2009. Disponible en: <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2019/10/Escenarios-para-el-Re%C3%BAso-del-Agua-Residual-Tratada-en-el-%C3%A1rea-Metropolitana-de-Monterrey-al-2021.pdf>
- Ayala-Vázquez, F. (2021). Reúso de agua residual tratada. Disponible en: <https://aloas.org/institucional/Documents/SADM%20Presentacion.pdf>
- Banco Interamericano de Desarrollo (2017). Documento de Marco Sectorial de Agua y Saneamiento. Disponible en: <https://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=EZSHARE-1739234685-13>
- Banco Interamericano de Desarrollo (2018). Agua y ciudades en América Latina: Retos para el desarrollo sostenible. Editado por I. Aguilar-Barajas et al. doi: 10.18235/0001107.
- Banco Interamericano de Desarrollo (2019). De estructuras a servicios. Disponible en: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/De-estructuras-a-servicios-El-camino-a-una-mejor-infraestructura-en-América-Latina-y-el-Caribe.pdf>
- Bello, J., C. Contreras, and J. Rodriguez (2016). “Atotonilco Wastewater Treatment Plant—Mexico.” Graduate School of Design, Harvard University. Disponible en: http://research.gsd.harvard.edu/zofnass/files/2016/08/05_Atotonilco_EN_FinalDocument.pdf
- Cademartori, J.J., (2007). El impacto de la inversión extranjera 1990-2000 sobre el desarrollo durable de la región minera de Antofagasta (Chile). Presses univ. de Louvain.
- Canales, A. (sin fecha). El Reúso y la Sustentabilidad ‘Proyecto Tenorio, SLP’. Degremont.
- Cepal (2019). Recursos hídricos. Disponible en: <https://www.cepal.org/es/temas/recursos-hidricos>
- Chapple, P. (2008). Planta de Tratamiento de Aguas La Farfana. Disponible en: <https://zdocs.com.br/doc/la-farfanapdf-d6wnk7gkey68>
- Consortio ABC (2021). Nueva estimación del IBGE apunta a Grande ABC con 2 825 millones de habitantes. Disponible en: <https://consorcioabc.sp.gov.br/noticia/5013/-nova-estimativa-do-ibge-aponta-grande-abc-com-2,825-milhoes-de-habitantes> (Accedido: 24 noviembre 2021).

CPI. (2018). Reúso de agua servida transformaría a Antofagasta en un gran parque. Disponible en: <http://www.infraestructurapublica.cl/reuso-agua-servida-transformaria-antofagasta-gran-parque/>

Datshkovsky D. et al (2022). "Scarcity in the Land of Poverty", Banco Interamericano de Desarrollo. <https://publications.iadb.org/en/scarcity-land-plenty>

Departamento Autónomo de Cochabamba (sin fecha). 26 Instituciones conforman comité de plantas de tratamiento de aguas residuales. Disponible en: http://www.gobernaciondecochabamba.bo/article/es_BO/Prensa/Noticias/ (Accedido: 7 mayo 2020).

Diputados, C. De, Congreso, H. and Unión, D. (2008). Ley de Aguas Nacionales, pp. 1-103.

Econssa Chile S.A. (2013). Sistema de Disposición Final de las Aguas Servidas de Antofagasta. Disponible en: https://www.econssachile.cl/pdf/docs/estudios/GHD_WEB.pdf

Econssa Chile S.A. (2019). Econssa firma Acuerdo de Producción Limpia para Antofagasta. Disponible en: <https://www.econssachile.cl/comunicaciones/comunicados/199-econssa-firma-acuerdo-de-produccion-limpia-para-antofagasta>

Econssa Chile S.A. (2021). Planta de reúso de AS Salar del Carmen. Disponible en: <https://www.econssachile.cl/proyectos/planta-de-reuso-de-as-salar-del-carmen> (Accedido: 24 noviembre 2021).

El Chubunt (2016). Reglamentación Parcial de la Ley XI N° 35 «Código Ambiental de la Provincia del Chubut». Argentina.

El Chubunt, E. (2019). Se tratará técnicamente el tema de reúso de aguas grises. Disponible en: <https://www.elchubut.com.ar/nota/2019-3-23-23-15-0-se-tratar-tecnicamente-el-tema-de-reuso-de-aguas-grises>

Equihua, L. y Rojas, A. (2013). "Tenorio project: A case of sustainable development in Mexico, Desalination and Water Treatment", 51(1-3), pp. 169-174. doi: 10.1080/19443994.2012.714649.

Faleschini, M. (2016). Estrategias, dificultades y beneficios en la aplicación del reúso del agua tratada en tres municipios de la Patagonia, in IFRH. Buenos Aires, pp. 1-13.

France Vanegas, M. (2017). Estudio de rentabilidad económica y social del reúso de aguas residuales tratadas en riego en los valles bajos de Cochabamba. Banco Mundial. Disponible en: <http://documentos.bancomundial.org/curated/es/632611563796701741/text/Estudio-de-Rentabilidad-Económica-y-Social-del-Reúso-de-Aguas-Residuales-Tratadas-en-Riego-en-Los-Valles-Bajos-de-Cochabamba.txt> (Accedido: 7 Mayo 2020).

Fraser, J. (2017). "Peru Water Project: Cerro Verde Case Study – Mining-Community Partnership to Advance Progress on Sustainable Development Goal 6 (Access to Clean Water and Sanitation)". Canadian International Resources and Development Institute (CIRDI) Report 2017-002.

García-Salazar, E. M. (2019). El agua residual como generadora del espacio de la actividad agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México, Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional, 29(54). doi: 10.24836/es.v29i54.741.

Comisión Estatal de Agua (sin fecha). Plan Integral de Saneamiento Reúso de las aguas residuales tratadas de la ciudad de San Luis Potosí y su Zona conurbana de Soledad de Graciano Sanchez. Disponible en: <https://docplayer.es/22921349-Plan-integral-de-saneamiento.html>

Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit-GIZ (2016). Cooperación triangular México-Bolivia-Alemania. Cierre de proyectos 2012-2016. Disponible en: <https://docplayer.es/53266870-Planeacion-y-gestion-de-proyectos-de-ptars-1-cochabamba-el-abra-pucara-esmeralda-2-mexico-el-caracol-planta-atotonilco.html>

Gobierno Autónomo de Sacaba (sin fecha). Red de empresas hermanas de América Latina y el Caribe Capacitación en la operación y mantenimiento de PTAR. Sacaba. Disponible en: http://www.aloas.org/institucional/Documents/WOP-convenio-Sacaba-Durango_FINAL.pdf (Accedido: 7 mayo 2020).

Gobierno Autónomo Departamental de Cochabamba (sin fecha). Gobernador da inicio a la ejecución del proyecto piloto de sistema de riego agrícola con aguas de la planta de tratamiento de. Disponible en: http://www.gobernaciondecochabamba.bo/article/es_BO/Prensa/Noticias/gobernador+da+inicio+a+la+ejecucion+del+proyecto+-piloto+de+sistema+de+riego+agricola+con+aguas+de+la+planta+de+tratamiento++de/3601/?F291905450952QJ01WH= (Accedido: 7 mayo 2020).

Gobierno Autónomo Departamental de Cochabamba (sin fecha b). Según plan maestro de agua potable y saneamiento, Cochabamba debe tener agua potable al 100% el año 2020. Disponible en: http://www.gobernaciondecochabamba.bo/article/es_BO/Prensa/Noticias/segun+plan+maestro+de+agua+potable+y+saneamiento+cochabamba+debe+tener+agua+potable+al+100%25+el+año+2020+/2200/?F276661121547JNQYEV= (Accedido: 8 mayo 2020).

Grupo Banco Mundial (2020). "Wastewater: From Waste to Resource, Waster Global Practice". Disponible en: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/33436/146823SP.pdf?sequence=6&isAllowed=y>

GUJSP (2021). Grupo União de Jornais. Disponible en: <https://gujsp.com.br/apos-fim-de-multa-na-conta-sabesp-sobe-tarifa-da-agua-e-esgoto-em-84/> (Accedido: 24 de noviembre, 2021)

Hofste, R. W., S. Kuzma, S. Walker, E. H. Sutanudjaja, and M. F. Bierkens. 2019. "Aqueduct 3.0: Updated Decision-Relevant Global Water Risk Indicators." Washington, DC, United States: World Resources Institute.

iAgua (sin fecha). México, Bolivia y Alemania cooperan en materia de tratamiento de aguas residuales y reúso agrícola | iAgua. Disponible en: <https://www.iagua.es/noticias/alemania-bolivia-mexico/conagua/16/03/31/mexico-bolivia-y-alemania-cooperan-materia> (Accedido: 7 mayo 2020).

INE (2017). Instituto Nacional de Estadística de Chile. Disponible en: <http://www.censo2017.cl/descargue-aqui-resultados-de-comunas/>

IPCC. (2016). "IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change ORGANIZATION IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. 1-2". Disponible en: <https://www.ipcc.ch/>

Jamaica Observer (2013). "Profiting from waste". Disponible en: https://www.jamaicaobserver.com/environment/Profiting-from-waste_15264606

Jimenez, B. y Asano, T. (2015). "Water Reuse: An International Survey of current practice, issues and needs", Water Intelligence Online. IWA, 7, pp. 9781780401881-9781780401881. doi: 10.2166/9781780401881.

Lam Esquenazi, E., Rocco de la Fuente, F., Romero Aranguiz, L. (2001). Sistemas Integrados De Tratamiento Y Uso De Aguas Residuales En América Latina: Realidad y Potencial. Estudio General del Caso Antofagasta, Chile. IDRC - OPS/HEP/CEPIS.

Macias Melken, A. (2020). Gerente General de Agua y Energía de la empresa IDEAL. Entrevistado por David Smith para el estudio de identificación de lecciones aprendidas en reúso de agua residual tratadas y gestión de lodos en América Latina (RG-T3478).

MBR Central (2020). "Case Study Rose Hall". Disponible en: <https://mbrcentral.com/case-study/rose-hall/> (Acceso: 9 junio 2020).

Moreno, J.M., (2019). Congreso Nacional del Agua. Innovación y sostenibilidad. Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/88467/1/Congreso_Nacional_Agua_2019_27-52.pdf

Naciones Unidas. (2015a). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

Naciones Unidas. (2015b). Agua y saneamiento - Objetivo de Desarrollo Sostenible. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

Nava Treviño, S. P. (2013). Manifiesto de impacto ambiental modalidad particular (incluye actividad altamente riesgosa) construcción y operación del proyecto denominado la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR Atotonilco. Hidalgo. Disponible en: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgiraDocs/documentos/hgo/estudios/2013/13HI2013H0004.pdf>

NEPA (2013). "The Natural Resource Conservation Authority Act". Disponible en: https://www.nepa.gov.jm/new/legal_matters/laws/Environmental_Laws/Wastewater_and_Sludge_Regulations.pdf (Acceso: 25 mayo 2020).

Novonor (2010). Sabesp y Foz do Brasil desarrollan el mayor proyecto de agua de reúso del hemisferio sur. Disponible en: <https://www.novonor.com.br/es/comunicacion/releases/sabesp-y-foz-do-brasil-desarrollan-el-mayor-proyecto-de-agua-de-reuso-del>

Office Utilities Regulation (OUR) (2021). "Rose Hall Utilities Company Limited". Disponible en: <https://our.org.jm/sectors/water-sewerage/tariff-applications/>

Parlamento Europeo (2021). Economía circular: definición, importancia y beneficios. Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>

Real, C. (2018). PTAR Tenorio. Buenos Aires: Banco de Desarrollo de América Latina.

Retema (2021). Aquapolo: valorización de efluentes frente a desafíos del cambio climático. Disponible en: <https://www.retema.es/noticia/aquapolo-valoracion-de-efluentes-frente-a-desafios-del-cambio-climatico-BBCh>

Ritchie, R. and Ortiz-Ospina, M. (2018). "Measuring progress towards the Sustainable Development Goals". Disponible en: <https://sdg-tracker.org/water-and-sanitation> (Acceso: 13 May 2020).

SADM (2021). Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey. Disponible en: https://www.sadm.gob.mx/SADM/index.jsp?id_html=saneamiento

SEDAPAR (2016). Acta de Reunión y Acuerdos entre las Municipalidades de la Ciudad de Arequipa, SEDAPAR y Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. Disponible en: <https://www.sedapar.com.pe/wp-content/uploads/2016/11/Ampliación-y-Mejoramiento-del-Sistema-de-Emisores-y-Tratamiento-de-Aguas-Residuales-de-Arequipa-Metropolitana-Planta-LA-ENLOZADA.pdf> (Acceso: 14 de mayo 2020).

SEP. Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, Gobierno de Chile (s.f.). ECONSSA S.A. Disponible en: http://www.sepchile.cl/empresas-sep/servicios/econssa-sa/?no_cache=1 (Acceso junio 2020).

Silva, H. (2015). "Baseline Assessment Study on Wastewater Management Belize", GEF CReW Project: Belize, (January).

STATIN. (2018). "Statistical Institute of Jamaica". (2018). Population Statistics. Disponible en: https://statinja.gov.jm/Demo_SocialStats/Newpopulation.aspx (Acceso: 26 mayo 2020).

SUEZ en América Latina (sin fecha). En Santiago de Chile, ampliamos la capacidad de las plantas de tratamiento de aguas y generamos energía a través de biogás. Disponible en: <https://www.suez-america-latina.com/es/ofertasoluciones/historias-de-exito/nuestras-referencias/la-farfana-en-chile> (Acceso: 28 abril 2020).

UNESCO Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos (WWAP) (2020). "The United Nations world water development report 2020: water and climate change" - UNESCO Digital Library.

UNFCCC (sin fecha). Santiago Biofactory | Chile. Disponible en: <https://unfccc.int/climate-action/momentum-for-change/planetary-health/santiago-biofactory-chile> (Acceso: 28 abril 2020).

Valverde, J. L. (2018). Caso Cerro Verde—Arequipa—Perú. Un Proyecto Ganar—Ganar PTAR La Enlozada—Recuperación de un río—Reúso de agua. World Bank. Disponible en: <http://pubdocs.worldbank.org/en/853651544484593836/6-Jose-Luis-Valverde-Cerro-Verde.pdf>

World Bank Group (2018a). "Wastewater: From Waste to Resource. The Case of Atotonilco de Tula", Mexico. Disponible en: <http://documents.worldbank.org/curated/en/922441521175520658/pdf/124331-WP-P161389-15-3-2018-15-20-15-WMexicoAtotonilco.pdf> (Acceso: 28 abril 2020).

World Bank (2018b). "Wastewater: From Waste to Resource the Case of Arequipa, Peru". Disponible en: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/33110/Wastewater-From-Waste-to-Resource-The-Case-of-Arequipa-Peru.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

World Bank Group (2018c). "Wastewater: From Waste to Resource, The Case of San Luis Potosí", Mexico. Disponible en: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/29491/124330-WP-p161389-15-3-2018-15-18-14-WSanLuisPotosi.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

Yitani, J. et al. (2019). Casos de estudio en asociaciones público-privadas en América Latina y el Caribe. doi: 10.18235/0001696.

Zhang, Q. et al. (2017). "Sludge treatment: Current research trends", Bioresource technology. Elsevier, 243, pp. 1159-1172.



BID